



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit



Einfluss gesteigerter Recyclingraten auf
die Qualität von Ersatzbrennstoffen

Martin Johannes Berger, BSc

November 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 06.11.2022

Unterschrift Verfasser/in
Martin Johannes Berger

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Dr. mont. Sandra Viczek und BSc Maximilian Enengel für die fachlich kompetente Betreuung, sowie für den konstruktiven Input während der Erstellung dieser Arbeit. Weiters möchte ich den wissenschaftlichen und studentischen Mitarbeitern des AVAW danken, die mich bei der Durchführung der experimentellen Tätigkeiten unterstützt haben.

Im speziellen möchte ich noch meinen Eltern danken, die mir das Studium ermöglicht haben und mich währenddessen immer unterstützt haben.

Kurzfassung

Einfluss gesteigerter Recyclingraten auf die Qualität von Ersatzbrennstoffen

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss von gesteigerten Recyclingraten auf die Qualität von Ersatzbrennstoffen zu untersuchen, wobei hauptsächlich die Abfallzusammensetzung und der Heizwert betrachtet wurden. Durch Vorgaben aus dem Kreislaufwirtschaftsprogramm der Europäischen Union sind die Recyclingraten von Siedlungsabfall bzw. Gewerbeabfall bis zum Jahr 2025, 2030 und 2035 auf 55, 60 und 65 % zu erhöhen. Welche Auswirkungen diese Erhöhung auf die Zusammensetzung von gemischtem Gewerbeabfall haben kann, wurde mit Fokus auf die Kunststoff Fraktionen untersucht.

Der erste Versuchsschritt war eine Probenahme von gemischtem Gewerbeabfall. Es wurden insgesamt 10 Proben (E1 bis E10) gewonnen. Im Anschluss an die Probenahme erfolgte eine Siebung des Abfalls. Dafür kamen Siebschnitte mit den Größen 200, 100, 80, 60, 40, 20, 10 und 5 mm zum Einsatz. Der nächste Schritt war eine allgemeine Sortierung. Die Proben > 20 mm wurden in 18 unterschiedlichen Fraktionen sortiert. Nach dieser allgemeinen Sortierung folgte noch eine maschinell unterstützte Sortierung mit NIR-Technologie der 2D/3D Kunststoffe > 60 mm. Nach der Analyse der Abfallproben erfolgte die Auswertung der Daten. Basierend auf dem Ausgangs-Heizwert des Gewerbeabfalls wurde der Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten und Szenarien auf die Probenzusammensetzung und den unteren Heizwert untersucht.

Es zeigte sich, dass eine Erhöhung der Recyclingrate mit einer Entfernung von heizwertreichem Probenmaterial einhergeht. Die Heizwerte der Proben E1, E4 und E5 sinken von 15,0, 16,9 und 14,7 MJ/kg_{OS} beim 0 % Recyclingszenario, auf 12,1, 12,7 und 11,5 MJ/kg_{OS} beim Worst-Case Szenario.

In allen betrachteten Szenarien eignen sich die drei Proben nur für einen Einsatzort im Kalzinator/Hotdisc-Bereich eines Zementwerkes, sofern keine weiteren Aufbereitungsschritte gesetzt werden. Folglich könnte sich der Einsatzort mit steigender Recyclingrate von der Primär- hin zur Sekundärfeuerung verschieben.

Abstract

Influence of increased recycling rates on the quality of solid recovered fuels

The aim of this work was to investigate the influence of increased recycling rates on the quality of solid recovered fuels based on waste composition and the heating value. With the new Circular Economy Package of the European Union, the recycling rates of municipal and commercial waste shall be increased to 55, 60 and 65 % by the year 2025, 2030 and 2035. The influence of the increased recycling rates on the composition of mixed commercial waste was investigated, with a focus on the plastic fractions.

The first step was to take samples of mixed commercial waste. In total, 10 samples (E1 to E10) were taken. After the sampling, the following step was a screening of the waste. The used screening plates were 200, 100, 80, 60, 40, 20, 10 and 5 mm. After the screening, the samples > 20 mm were sorted in 18 different fractions. In the next step, near infrared technology was used to sort the 2D/3D plastic fractions > 60 mm. After these steps, the generated data was analysed. Based on the origin heating value of the commercial waste, the influence of different recycling rates on the waste composition and the lower heating value was investigated.

It could be shown that increased recycling rates of plastics correlate with a removal of material with high heating value. The heating value of the samples E1, E4 and E5 decreases from 15,0, 16,9 and 14,7 MJ/kg_{OS} in the 0 % Recycling scenario, to 12,1, 12,7 and 11,5 MJ/kg_{OS} in the Worst-Case scenario.

At all observed scenarios, the three waste samples can only be used at the secondary area in a cement factory, if there are no further processing steps. With an increased recycling rate, the application area for fuels maybe shifts from primary to secondary firing.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Theoretisches zu Ersatzbrennstoffen.....	3
1.1.1 Allgemeines	3
1.1.2 Herstellung	5
1.1.3 Klassifizierung.....	7
1.1.4 Einsatzgebiet, Grenzwerte und Qualität	8
1.1.5 Zusammensetzung von EBS.....	11
1.2 Problemstellung	11
1.3 Zielsetzung	12
2 MATERIAL UND METHODEN	13
2.1 Verwendete Geräte und Inventar	13
2.1.1 Probenlagerung und Transport	13
2.1.2 Verwendete Waagen	14
2.1.3 Komptech Terminator 5000S	16
2.1.4 Komptech Multimeasure	16
2.1.5 Trommelsieb	16
2.1.6 Sortiertisch inklusive Probenkübel	17
2.1.7 NIR-Sortiergerät.....	18
2.2 Probenahme	19
2.3 Siebung.....	20
2.4 Allgemeine Sortierung.....	21
2.4.1 Durchführung der allgemeinen Sortierung.....	21
2.4.2 Verjüngung	22
2.5 Chemische Analysen	23
2.6 Sortierung nach Kunststoffarten	23
2.7 Unterschiedliche Szenarien zur Abfallzusammensetzung	25
2.8 Änderungen der Heizwerte	27
2.8.1 Berechnung der Heizwerte der Gesamtproben	28
2.8.2 Heizwert bei unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten	28
3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	29
3.1 Probenahme	29
3.2 Siebung.....	29

3.2.1	Ergebnis	29
3.2.2	Diskussion	34
3.3	Allgemeine Sortierung.....	35
3.3.1	Ergebnis	35
3.3.2	Diskussion	44
3.4	Sortierung nach Kunststoffarten	45
3.4.1	Ergebnis	45
3.4.2	Diskussion	51
3.5	Einfluss von unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten	53
3.5.1	Ergebnis	53
3.5.2	Diskussion	56
3.6	Berechnung der Heizwerte der Gesamtproben.....	58
3.6.1	Ergebnis	58
3.6.2	Diskussion	59
3.7	Heizwert bei unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten.....	60
3.7.1	Ergebnis	60
3.7.2	Diskussion	63
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN	64
4.1	Eignung der Abfälle als Ersatzbrennstoffe	64
4.2	Kurz- und Mittelfristige Betrachtung	65
5	ZUSAMMENFASSUNG	67
6	VERZEICHNISSE	69
6.1	Literatur.....	69
6.2	Abkürzungsverzeichnis	70
6.3	Tabellen.....	71
6.4	Abbildungen.....	73

1 Einleitung

Bereits Anfang der 70er Jahre stieg nach Pruckner (2003) das Interesse nach einer gezielten mechanischen Aufbereitung von Restabfällen zu Ersatzbrennstoffen. Durch begrenzte Primärenergiereserven, welche sich in den Jahren 1973 und 1974 in Folge der Ölkrise deutlich in den Rohstoff- und Energiepreisen ausdrückten, entstand plötzlich europaweit ein Interesse für Abfälle. Diese sah man bis zu diesem Zeitpunkt als nicht erschlossene Rohstoffe an. Im Wesentlichen basiert die Idee der Sortierung von Abfällen zur Brennstoffgewinnung damit auf energiewirtschaftlichen Überlegungen. Konventionelle Primärenergieträger sollten durch alternative Brennstoffe ergänzt und wenn möglich substituiert werden.

1.1 Theoretisches zu Ersatzbrennstoffen

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgen jeweils kurze Erläuterungen zu Ersatzbrennstoffen in den Bereichen Allgemeines, Herstellung, Klassifizierung, Einsatzgebiete, Grenzwerte, Qualität sowie Substitutionsraten.

1.1.1 Allgemeines

Gemäß der aktuell geltenden Fassung der Abfallverbrennungsverordnung (AVV) sind Ersatzbrennstoffe *„Abfälle, die zur Gänze oder in einem relevanten Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung eingesetzt werden und die die Vorgaben gemäß Anlage 8 erfüllen. Ein relevantes Ausmaß zum Zweck der Energiegewinnung liegt vor, wenn eine selbstgängige Verbrennung ohne Zusatzfeuerung möglich ist.“* (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend 2022). Anhang 8 enthält verschiedene Vorgaben für Abfälle wie z.B.: Schadstoffgehalte, die für die Verbrennung in unterschiedlichen Mitverbrennungsanlagen laut erforderlich sind.

Für Ersatzbrennstoffe gibt es nach Lorber et al. (2010) eine Reihe unterschiedlicher Bezeichnungen, welche manchmal durchaus zu Verwirrung führen können:

- **BraM:** Brennstoff aus Müll, wurde in den 80er Jahren eingeführt, hat sich aber nicht durchgesetzt
- **SBS:** Substitutbrennstoff aus Siedlungsabfällen,
- **ABS:** Alternativbrennstoff,
- **ASB:** Aufbereiteter Substitut Brennstoff,
- **BGB:** Brennstoff aus produktionsspezifischen Gewerbeabfällen,
- **RDF:** Refuse Derived Fuels,
- **SRF:** Solid Recovered Fuels,
- **EBS:** Ersatzbrennstoff

International gebräuchlich sind nach Viczek et al. (2021) die Begriffe RDF und SRF. Die SRF stellen dabei eine Subgruppe von RDF dar und sind qualitätsgesichert. Hergestellt werden die SRF nur aus nicht gefährlichen, überwiegend gemischten festen Abfällen. Eine Definition von SRF erfolgt in der Norm ISO 21640.

Für die Primär- und Sekundärfeuerung gibt es laut Viczek et al. (2020) folgende Einteilung:

- SRF Primärfeuerung: SRF mit einem unteren Heizwert zwischen 18 und 25 MJ/kg_{OS} und einer Partikelgröße kleiner 30 (35) mm.
- SRF Sekundärfeuerung: SRF mit einem unteren Heizwert zwischen 12 und 18 MJ/kg_{OS}. Bis zu einer Partikelgröße von 80 mm erfolgt ein Einsatz im Kalzinator oder Ofeneinlauf. Partikelgrößen bis 300 mm können in eine Hotdisc-Brennkammer eingebracht werden.

Ersatzbrennstoffe können entweder in flüssiger oder fester Form eingesetzt werden. Flüssige Brennstoffe werden nach Pomberger und Curtis (2012) aus heizwertreichen flüssigen Abfällen, wie z.B.: Altöl, Lösungsmittelresten etc. hergestellt. Die Herstellung fester Brennstoffe erfolgt aus heizwertreichen festen Abfällen wie z.B.: Kunststoffen, Papier etc.

Im Zuge dieser Masterarbeit wird der Fokus auf den Einsatz von festen Ersatzbrennstoffen in der Zementproduktion gelegt.

Substitutionsraten von EBS in Zementwerken:

In Österreich haben Zementunternehmen laut Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (2019) bereits frühzeitig damit begonnen, konventionelle Energieträger wie Kohle, Petrolkoks und Gas durch alternative Brennstoffe (EBS) zu ersetzen. Um dies zu bewerkstelligen, wurde in den vergangenen Jahrzehnten in moderne technische Anlagen und Komponenten investiert. In Abbildung 1 ist die Substitutionsrate von EBS in der Zementindustrie in den Ländern Indien, USA, EU-28 und Österreich dargestellt.

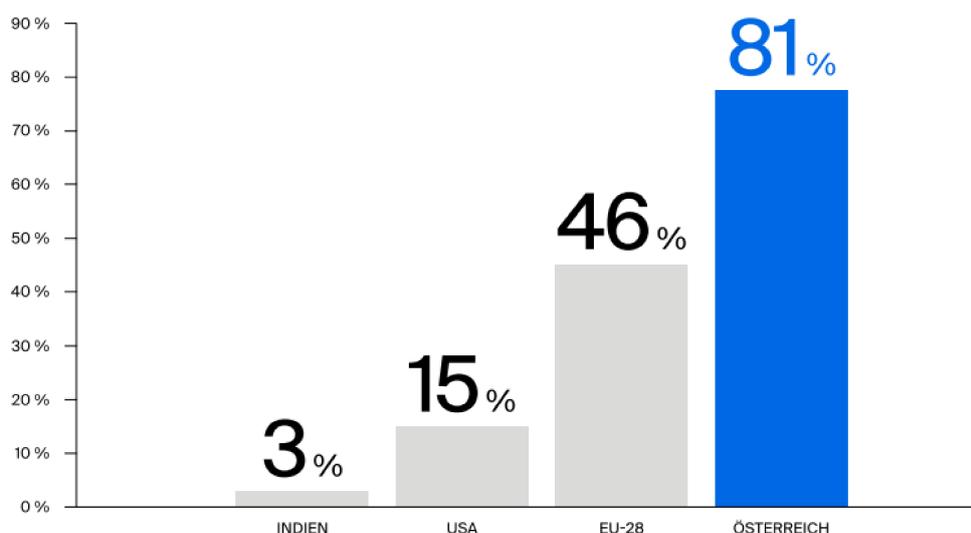


Abbildung 1: Substitutionsraten in der Zementindustrie, Quelle: Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (2019)

Abbildung 1 mit Daten aus dem Jahr 2017 zeigt, dass Österreich im internationalen Vergleich die weltweit höchste Einsatzrate von EBS vorweisen kann. Im Jahr 2018 wurden in österreichischen Zementwerken bereits 81,2 % des thermischen Energiebedarfs durch alternative Brennstoffe abgedeckt. Für alle heimischen Zementwerke ergibt das nach Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (2019) eine Einsatzmenge von 555.614 t EBS. Einzelne Zementwerke in Österreich erreichen mittlerweile bereits Substitutionsraten von 90 % und mehr. Sarc (2015) hat gezeigt, dass selbst 100 % Substitutionsrate möglich ist.

1.1.2 Herstellung

Ein modernes Schema für einen Abfallbehandlungsprozess zur Erzeugung von EBS ist in Abbildung 2 ersichtlich. Laut Sarc und Viczek (2022) erfolgt eine Beschreibung des Behandlungsprozesses. Als Inputmaterial dienen gemischte, nicht gefährliche Siedlungs- und Gewerbeabfälle sowie Sperrmüll. Auf eine Zwischenlagerung mit einer Homogenisierung folgt die Aufgabe in einen Vorzerkleinerer. Nach einem Splitter, der Abfallpartikel > 300 mm aus dem Prozess ausschleust und deren Rückführung in den Vorzerkleinerer ermöglicht, folgen ein Fe-Abscheider und ein Vibrosieb. Das Vibrosieb teilt den Abfallstrom in > 60 mm und < 60 mm auf. Die Fraktion < 60 mm wird aus dem Prozess ausgeschleust, mittels einem Fe- und NE-Abscheider von Metallen befreit und durchläuft ein Kontrollsieb, um ggf. größere Partikel abzusieben. Die Fraktion > 60 mm gelangt in einen Windsichter und wird in Leichtfraktion und Schwerfraktion aufgeteilt. Aus der Leichtfraktion erfolgt, nach einer Zerkleinerung und weiteren Fe-Abscheidung, die Herstellung von „SRF Primary“, also SRF für die Primärfeuerung. Die Schwerfraktion, aus der SRF für die Sekundärfeuerung hergestellt wird, gelangt nach einem Fe- und NE-Abscheider zu einer sensorbasierten Nahinfrarot (NIR) Sortierung. Eine NIR-Sortierung dient im Allgemeinen dazu, anhand von Infrarotspektren Elemente oder Elementverbindungen spezifisch auszuschleusen. Bei der Produktion von EBS wird die NIR-Technologie vorrangig zum Entfernen von PVC eingesetzt. Nach dem NIR-Sortierer wird die Schwerfraktion zerkleinert, gesiebt und als letzter Verfahrensschritt erfolgt noch eine Abtrennung von Schwer- und Inertstoffen. Diese Behandlungsschritte führen zu folgenden Fraktionen:

- **SRF Primary**
- **SRF Secondary fein**
- **SRF Secondary grob**
- **PVC-Kunststoffe**
- **Schwer- und Inertstoffe**
- **Fraktion < 60 mm**
- **NE-Metalle**
- **Fe-Metalle**

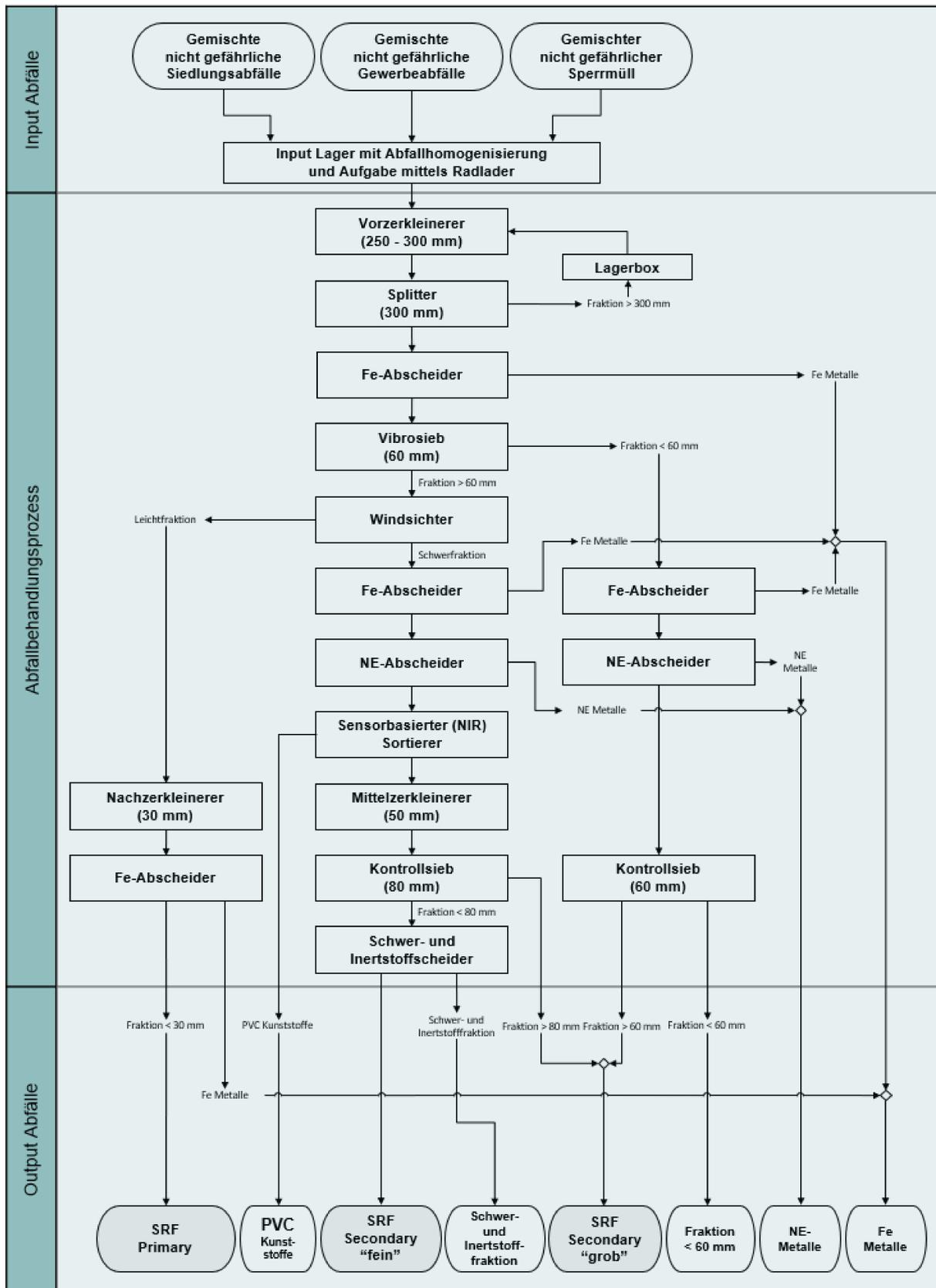


Abbildung 2: Fließbild des Prozessschemas einer modernen Anlage, Quelle: Sarc und Viczek (2022)

1.1.3 Klassifizierung

Die unterschiedlichen industriellen Verbrennungsanlagen und Verfahren haben nach Lorber et al. (2010) verschiedene Anforderungen an die EBS Qualität. Zu den wesentlichen Parametern zählen unter anderem der Heizwert (Hu mit der Einheit [MJ/kg]) und die Korngröße (d_{90} in [mm]). In Abbildung 3 ist der Zusammenhang von Heizwert und Korngröße unterschiedlicher Ersatzbrennstoffe inklusive ihrem Einsatzort dargestellt.

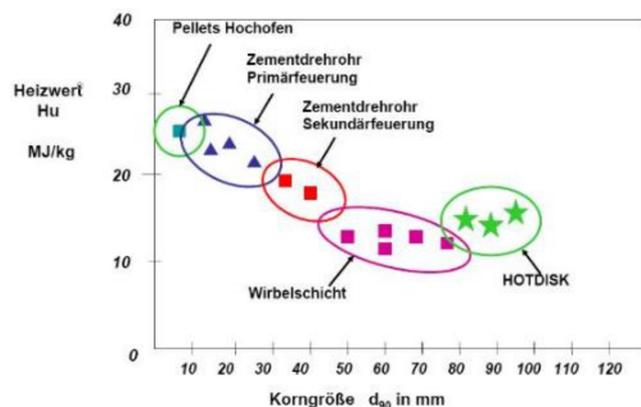


Abbildung 3: Einsatzgebiet verschiedener EBS Arten, abhängig von Heizwert und Korngröße, Quelle: Lorber et al. (2010)

Eine weitere mögliche Klassifizierung von Ersatzbrennstoffen, abhängig von relevanten brennstoffspezifischen Kriterien, ist in nachfolgender Tabelle 1 beschrieben. „EBS-Premium“ entspricht dabei „SRF-Primary“ in Viczek et al. (2020), „Kalzinatorfeuerungs EBS“ entspricht der Bezeichnung „SRF-Secondary“.

Tabelle 1: Klassifizierung von Ersatzbrennstoffqualitäten, Quelle: Lorber et al. (2010)

Kriterium	Ersatzbrennstoffqualitäten					
	Kohlekraftwerk EBS	„EBS-Low“ (Rostfeuerungs)	„EBS-Classic“ (Wirbelschicht)	Kalzinatorfeuerungs EBS	„EBS-Premium“ (Primärfeuerungs)	Hochofen EBS
Heizwert	11-15 MJ/kg	12-16 MJ/kg	12-16 MJ/kg	11-18 MJ/kg	22-25 MJ/kg	> 25 MJ/kg
Korngröße	< 50 mm pelletiert	< 300 mm	< 20-100 mm	< 50-80 mm	< 10-30 mm	< 10 mm pelletiert
Übergröße	0 %	< 3 %	< 2 %	< 1 %	< 1 %	0 %
Störstoffgehalt	< 1 %	< 3 %	< 1 %	0	< 1 %	0 %

Chlorgehalt	< 1,5 %	< 1 %	< 0,8 %	< 0,8 %	< 0,8 %	< 2 %
Aschegehalt	< 35 %	-	< 20 %	-	< 10 %	< 10 %

1.1.4 Einsatzgebiet, Grenzwerte und Qualität

Einsatzgebiet:

Nach Lorber et al. (2010) werden Mitverbrennungsanlagen in drei Typen von Anlagen unterteilt:

- Anlagen für die Zementproduktion
- Kraftwerksanlagen
- Sonstige Mitverbrennungsanlagen

Bei Anlagen zur Zementproduktion wird nach Pomberger (2008) der Ersatzbrennstoff, je nach Qualität entweder in der Primär- oder Sekundärfeuerung eingesetzt, zu sehen in Abbildung 4. Primär bedeutet in diesem Fall der Einsatz von hochkalorischem Brennstoff am Ende des Drehrohrs. Eingebracht wird dieser über den Hauptbrenner, auch Mainburner genannt. Der sekundärseitige Einsatz erfolgt am Anfang des Drehrohrs. Hier wird mittelkalorischer Brennstoff, entweder über den Kalzinator, den Ofeneinlass oder ein alternatives Hotdisc-Verfahren, eingebracht. Das Hotdisc-Verfahren kann dabei noch größere Partikel als der Kalzinator verarbeiten.

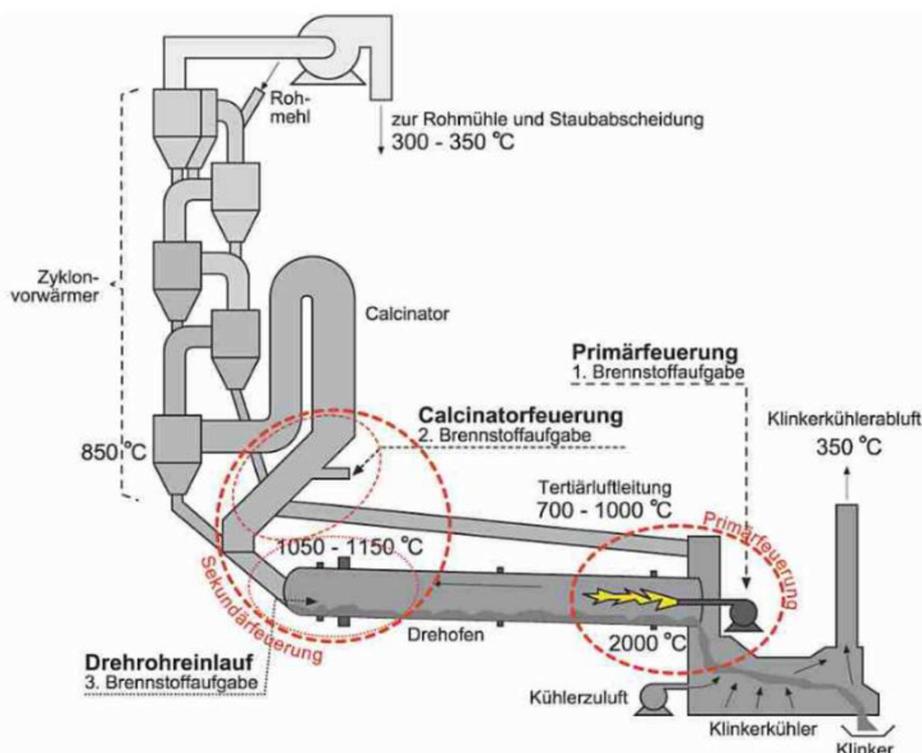


Abbildung 4: Primär- und Sekundärfeuerung in einem Zementwerk, Quelle: Pomberger (2008)

Laut Gehrman et al. (2012) können Kraftwerksanlagen, die zur Strom- und/oder Dampferzeugung eingesetzt werden, neben fossilen Brennstoffen, auch Ersatzbrennstoffe verfeuern.

Als sonstige Mitverbrennungsanlage kann nach Lorber et al. (2010) ein Hochofen in einem Stahlwerk genannt werden. Der Einsatz erfolgt hier ebenfalls in Pelletsform. Im Hochofen eingeblasener Ersatzbrennstoff ersetzt hier Koks oder Heizöl. Genutzt wird hierbei die bei der Verbrennung entstehende Energie, sowie die erzeugten Verbrennungsgase als Reduktionsmittel.

Grenzwerte:

In folgender Tabelle 2 werden die Grenzwerte für Abfälle bei der Verbrennung in verschiedenen Mitverbrennungsanlagen dargestellt. Diese sind in Anlage 8 der AVV aufgeführt. Beim Einsatz von EBS in Kraftwerken ist nach Lorber et al. (2010) zu beachten, dass der Anteil der Brennstoffwärmeleistung aus der Verbrennung von EBS oder Abfällen in Braunkohle- oder Steinkohlekesseln mit max. 15 M % begrenzt ist. Zudem hängen die Grenzwerte vom mitverbrannten Anteil des Ersatzbrennstoffes ab. Die in der Tabelle 2 angeführten $\leq 10 \%$ bzw. $\leq 15 \%$ sind der prozentuale Anteil der Brennstoffwärmeleistung aus der Verbrennung von Abfällen an der Gesamtbrennstoffwärmeleistung.

Die Grenzwerte werden mit nachfolgender Formel 1 berechnet:

$$\text{Grenzwert} \left[\frac{\text{mg}}{\text{MJ}} \right] = \frac{\text{Schadstoffgehalt} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg TM}} \right]}{\text{Heizwert} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg TM}} \right]} \quad (1)$$

TM: Trockenmasse

Tabelle 2: Grenzwerte in [mg/MJ] für Abfälle bei der Verbrennung in unterschiedlichen Mitverbrennungsanlagen, Quelle: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2022)

Parameter	Zementwerk [mg/MJ]		Kraftwerk $\leq 15 \%$ [mg/MJ]				Sonstige Mitverbrennungsanlage [mg/MJ]	
	Median	80er Perzentil	$\leq 10 \%$		$\leq 15 \%$		Median	80er Perzentil
			Median	80er Perzentil	Median	80er Perzentil		
Sb	7	10	7	10	7	10	7	10
As	2	3	2	3	2	3	1	1,5
Pb	20	36	23	41	15	27	15	27
Cd	0,23 ¹⁾	0,46 ¹⁾	0,27	0,54	0,17	0,34	0,17	0,34
Cr	25	37	31	46	19	28	19	28

Co	1,5	2,7	1,4	2,5	0,9	1,6	0,9	1,6
Ni	10	18	11	19	7	12	7	12
Hg	0,075	0,15	0,075	0,15	0,075	0,15	0,075	0,15

1) Es gilt für qualitätsgesicherte Ersatzbrennstoffe (Schlüssel-Nummer 91108 gemäß Abfallverzeichnisverordnung, BGBl. II Nr. 570/2003, in der geltenden Fassung) für den Median ein Grenzwert von 0,45 mg/MJ und weiters für das 80er Perzentil ein Grenzwert von 0,7 mg/MJ laut Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2022).

Qualitätssicherung:

Damit sich ein Anlagenbetreiber für die Mitverbrennung von EBS entscheidet, müssen nach Lorber et al. (2010) drei grundsätzliche Voraussetzungen gegeben sein:

- Versorgungssicherheit,
- Rechtssicherheit und
- Qualitätssicherheit.

In der AVV ersichtlich in Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2022) wird detailliert aufgeführt welche Grenzwerte, Berechnungsmethoden und Vorgaben für eine Probenahme einzuhalten sind, um eine geforderte Qualität zu gewährleisten. Bei der Probenahme wird hier im speziellen auf die Probenahmeplanung, die eigentliche Probenahme und die Durchführung von Untersuchungen verwiesen. Mit Hilfe der ÖNORM EN 15442 für feste Sekundärbrennstoffe kann ein Probenahmeplan ausgearbeitet werden.

Für die Qualitätssicherung von Analyseergebnissen müssen nach Lorber et al. (2010) folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Es sind ausreichend große Probenmengen, Zwischenerkleinerungen und Probenteilungen erforderlich, um den zufälligen Fehler zu minimieren.
- Falsche Probenvorbereitung und Entmischung können hohe systematische Fehler zur Folge haben.
- Zur Sicherung der Qualität sind Einzelmessungen nicht aussagekräftig genug, sie stellen also ein ungeeignetes Mittel zur Qualitätsbeurteilung von einzelnen Chargen dar.
- Aussagekräftig sind hier lediglich Durchschnittswerte über einen längeren Zeitraum. Diese Werte unterliegen nicht der Normalverteilung. Für eine bessere Aussagekraft wird daher der Median bzw. der 80er Perzentilwert herangezogen und nicht der Mittelwert und die Standardabweichung.

1.1.5 Zusammensetzung von EBS

Die Zusammensetzung eines EBS mit Premium Qualität wurde von Sarc et al. (2019) untersucht und wird in Tabelle 3 als Mittelwert über sieben Einzelproben dargestellt. Die in dieser Probe enthaltenen Wertstoffe sind z.B.: Papier, Pappe und Karton mit 10,5 % und die Kunststoff- und Leichtfraktion mit 19,8 % Massenanteil.

Tabelle 3: Zusammensetzung einer EBS Probe mit Premium Qualität, Quelle: Sarc et al. (2019), modifiziert von Martin Berger

Fraktionen	Gew. % _{OS}
Organik/ Biologischer Abfall	0,0
Papier, Pappe und Karton	10,5
Sanitär Artikel	0,5
Kunststoff und Leichtfraktion	19,8
Verbund Material	1,1
Textil	9,3
Glas	0,1
Inert	0,5
Metalle	0,5
Gefährliche Hausmüll	0,0
Feinfraktion < 11,2 mm	51,4
Rest (Undefiniert)	6,3
Summe	100

1.2 Problemstellung

Mit dem Circular Economy Package hat die europäische Kommission ambitionierte Ziele für das Recycling von Siedlungsabfällen vorgegeben. Laut Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022), sowie Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2014) müssen bis zum Jahr 2025 55 Gewichtsprozent der Siedlungsabfälle recycelt werden. Ab dem Jahr 2030 steigt der

Prozentsatz auf 60 %. Bis 2035 sollen es 65 % sein. Nicht nur durch die Veränderung dieser gesetzlichen Rahmenbedingungen, sondern auch durch die kontinuierlichen gesellschaftlichen Entwicklungen, das sich ständig ändernde Konsumverhalten oder die potentielle Einführung eines Pfandsystems, stehen die Abfallströme im stetigen Wandel. Die Abfallwirtschaft wird durch diese Veränderungen, entlang der gesamten Wertschöpfungskette, vor erhebliche Herausforderungen gestellt. Beispielsweise müssen zur Erreichung der EU-Vorgaben höhere Mengen der Materialien aus Siedlungsabfällen aussortiert werden, die einen vergleichsweise hohen Brennwert haben und damit bisher einen wichtigen Bestandteil von Ersatzbrennstoffen für die Zementindustrie darstellten. Sowohl für die Abfallwirtschaft als auch die Zementindustrie ist es daher wichtig, einzuschätzen, wie sich die geänderten Rahmenbedingungen auf die Brennstoffparameter von Ersatzbrennstoffen auswirken und ob, bzw. unter welchen Umständen, diese Ersatzbrennstoffe für den Einsatz in der Zementindustrie geeignet sind. Dafür sind jedoch weitere Daten erforderlich.

1.3 Zielsetzung

Im Zuge von praktischen Versuchen soll gemischter Gewerbeabfall repräsentativ beprobt und anschließend chemisch und durch händische Sortierung charakterisiert werden. Dabei soll der Fokus auf recyclingfähige Fraktionen gelegt werden. Die gewonnenen Daten sollen zur Erstellung verschiedener Szenarien zur zukünftigen Abfallzusammensetzung herangezogen werden (z.B. Zusammensetzung und Heizwert, wenn ein bestimmter Anteil der PE-Kunststoffe entfernt wird, zusätzlich noch PP, PET und PS). Aus diesen Modellen sollen schließlich die Veränderungen der für Ersatzbrennstoffe maßgeblichen Parameter ermittelt werden, die Eignung der Abfälle als Ersatzbrennstoff für die Zementindustrie evaluiert werden und mögliche Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

2 Material und Methoden

Das Kapitel Material und Methoden stellt den Hauptteil der Masterarbeit dar. Hier erfolgt die Beschreibung der verwendeten Geräte und Materialien, sowie der angewandten Methoden bei der Durchführung der praktischen Versuche.

2.1 Verwendete Geräte und Inventar

In diesem Kapitel erfolgt eine Auflistung der verwendeten Geräte und Utensilien. Inklusive der Maschinen, welche zum Inventar am Technikum Standort des AVAW-Lehrstuhls in St. Michael, der Montanuniversität in Leoben, sowie zu externen Firmen gehören.

2.1.1 Probenlagerung und Transport

Die Lagerung der Proben und der Transport erfolgte sowohl in einfachen Müllsäcken als auch in Maurerwannen und Abfallbehältern unterschiedlichster Größen.

- a) Müllsäcke mit den Größen 20 l, 25 l, 35 l, 70 l, 110 l und 120 l

In der folgenden Abbildung 5 sind die am häufigsten verwendeten Müllsäcke beispielhaft abgebildet.



Abbildung 5: Verwendete Abfallsäcke, Quelle: <https://www.swirl.at>

- b) Mörtelwannen mit den Größen 60 l und 90 l

Diese Wanne ist beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Verwendete Mörtelwanne, Quelle: <https://www.obi.at/baueimer-moertelkuebel/lux-moertelwanne-90-l/p/1829498>

- c) Abfallbehälter mit den Größen 240 l und 1100 l

Die Abfallbehälter sind in nachfolgender Abbildung 7 ersichtlich.



Abbildung 7: Abfallbehälter mit den Größen 240 l (linkes Bild), Quelle: Martin Berger; und 1100 l (rechtes Bild), Quelle: <https://www.plasteelaste.de/mini-muellcontainer-1100-liter>

2.1.2 Verwendete Waagen

Hier erfolgt eine Auflistung der verwendeten Waagen am Technikum Standort in St. Michael, sowie an der Montanuniversität in Leoben.

- a) Feinwaage der Firma Kern, diese ist in Abbildung 8 mit ihren Spezifikationen detailliert abgebildet. Die Modellnummer lautet 572-49. Die Seriennummer ist W072262 und die Genauigkeit beträgt 0,1 g.



Abbildung 8: Feinwaage der Firma Kern, Quelle: Martin Berger

- b) Waage der Firma G&G, dargestellt in folgender Abbildung 9. Die Modellnummer ist PSE-200, die Seriennummer lautet 702020121225. Für den Bereich 0 – 50 kg ist die Genauigkeit 10 g, für 50 – 200 kg beträgt sie 20 g.



Abbildung 9: Waage der Firma G&G, Quelle: Martin Berger

- c) Schwerlastwaage der Firma Kern, in der nachfolgenden Abbildung 10 dargestellt. Die Modellnummer lautet IFB 300K-2, die Seriennummer ist WF18020196. Hier beträgt die Genauigkeit 0,01 kg.



Abbildung 10: Schwerlastwaage der Firma Kern, Quelle: Martin Berger

- d) Laborwaage der Firma G&G, ersichtlich in der folgenden Abbildung 11. Die Modellnummer ist TC 200K, die Seriennummer lautet 362013110011. Die Genauigkeit beträgt 1 g.



Abbildung 11: Laborwaage der Firma G&G, Quelle: Martin Berger

2.1.3 Komptech Terminator 5000S

Bei der Grobzerkleinerung für die anschließende Probenahme der Proben E1 bis E10 kam ein Vorzerkleinerer der Firma Komptech zum Einsatz, dieser ist in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 12: Komptech Terminator 5000S, Quelle: <https://www.komptech.com/produkte/terminator-e-mobile/#/>

2.1.4 Komptech Multimeasure

Weiters kam von der Firma Komptech bei der Probenahme noch ein Multimeasure zum Einsatz, welcher in Abbildung 13 ersichtlich ist. Bei diesem Gerät handelt es sich um ein umgebautes mobiles Sternsieb. Es beinhaltet ein Förderband mit einer eingebauten Waage und einem Volumenstromsensor. Für diese Versuche wurde davon nichts verwendet. Wichtig für die Probenahme war das schwenkbare Austragsband.



Abbildung 13: Komptech Multimeasure, Quelle: <https://www.komptech.com/produkte/multistar-one/#/>

2.1.5 Trommelsieb

Für die Einteilung der Proben E1 bis E10 in unterschiedliche Korngrößenbereiche wurde ein Trommelsieb mit austauschbaren Siebschnitten verwendet. Beim verwendeten Sieb handelt es sich laut Khodier et al. (2020) um ein Trommelsieb mit der Form eines gleichseitigen Oktagons. Dieses ist schematisch in Abbildung 14 bzw. Abbildung 15 dargestellt. Die

achteckige Form ergibt sich durch die Anordnung der austauschbaren Siebplatten. Platten mit folgenden Siebdurchmessern können in den Siebrahmen eingesetzt werden (in mm): 200, 100, 80, 60, 40, 20, 10 und 5. Die Form der Sieböffnungen ist kreisförmig. Der Siebüberlauf ist jenes Material, welches nach einem Siebvorgang in der Trommel verbleibt. Material, das durch die Siebplatten hindurchfällt, ist der Siebdurchgang. Dieses Material sammelt sich in einer auf Rollen beweglich gelagerten Holzwanne, welche sich unterhalb des Siebes befindet. Angetrieben wird das Sieb über ein kleines Metallrad mit Kunststoffbereifung. Dieses Rad hat Kontakt zum kreisrunden Rahmen der Siebtrommel und treibt dieses mittels Kontaktreibung an. Weiters ist das Rad über ein Getriebe mit dem eigentlichen Antriebsmotor verbunden.

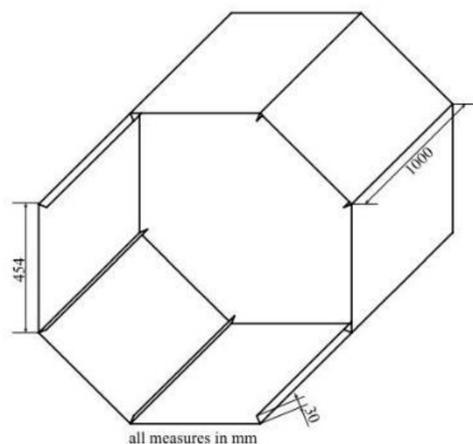


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Trommelsiebs inklusive Abmessungen in mm, Quelle: Khodier et al. (2020)



Abbildung 15: Trommelsieb mit austauschbaren Siebschnitten, Quelle: Martin Berger

2.1.6 Sortiertisch inklusive Probenkübel

Die Sortierung der zuvor gesiebten Proben erfolgte auf einem Sortiertisch, dieser ist in Abbildung 16 ersichtlich. Die einzelnen Fraktionen wurden in weiße 10 l Kunststoffkübel aussortiert. Beim verwendeten Sortiertisch handelt es sich im Prinzip um eine einfache

Holzplatte an deren Rand, jeweils unten und oben, Aluprofilschienen montiert sind. Diese Aluschienen erhöhen zum einen die Handhabbarkeit der Holzplatte und zum anderen verhindern sie, dass während des Sortiervorgangs Probenmaterial einfach über den Tischrand geschoben werden kann. Dieser Umstand war wichtig, nicht nur für den Sortiervorgang, sondern auch für eine Verjüngung von Probenmaterial, welche für einen Teil der Abfallproben ebenfalls auf dem Sortiertisch durchgeführt wurde. Der Sortiertisch ist hierfür mit Klebeband in entsprechende Bereiche unterteilt, gut sichtbar in Abbildung 16. Aufgestellt wird der Tisch auf kleinen tragbaren Metallbalken. Diese sind einklappbar und können in der Höhe verstellt werden.



Abbildung 16: Sortiertisch inklusive Probenkübel am Standort St. Michael, Quelle: Martin Berger

2.1.7 NIR-Sortiergerät

Eine Sortierung nach Kunststoffarten erfolgte mit einem von Binder&Co eigens hergestellten NIR-Sortierer des AVAW (Abbildung 17). Der Sortierer verfügt über einen EVK HELIOS NIR G2-320 Sensor mit einem Spektralbereich von 0.9–1.7 μm .



Abbildung 17: NIR-Sortierer im Altlastenlabor des AVAW, Quelle: Martin Berger

In Abbildung 17 ist der gesamte Anlagenaufbau inklusive Schaltschrank und Bedienmonitor zu sehen. Weitere Aufnahmen sind in Abbildung 18 ersichtlich.



Abbildung 18: NIR-Sortierer, rechts: Probenbehälter mit Trennblech, Mitte: Düsenleiste, links: Aufgabetrichter mit Rüttelwanne und geneigter Detektorfläche, Quelle: Martin Berger

Zu sehen ist hier links der Aufgabetrichter mit Rüttelwanne für den Proben transport. Die Stärke der Vibration der Wanne und damit die Geschwindigkeit des Proben transportes, kann eingestellt werden. Danach folgt eine geneigte Detektorfläche mit einer Lichtleiste am unteren Ende. Gegenüber der Detektorfläche befindet sich der Infrarotsensor (zu sehen ist hier lediglich die Rückseite). Im mittleren Bild ist die Düsenleiste dargestellt. Mit ihr erfolgt die Aussortierung der Probe in den hinteren (rechtes Bild, rechter Behälter) Probenbehälter mittels Druckluftstoß. Der Luftdruck, mit dem die Düsenleiste arbeitet, ist variabel einstellbar. Weitere einstellbare Parameter sind das „Rezept“, also die verwendeten Farbspektren und die diesen Spektren zugeordneten Kunststoffe. Ebenfalls einstellbar ist die Empfindlichkeit der Aussortierung und die relative Gewichtung der Kunststoffe untereinander.

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am Standort der Firma Mayer Recycling in St. Michael. Versuchsdatum war der 03.03.2022. Beim Ausgangsmaterial für die Versuche handelte es sich um gemischten Gewerbeabfall. In Abbildung 19 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Versuchsablauf für die Probenahme der Proben E1 bis E10:

Um eine repräsentative Probenahme sicherzustellen, wird der Abfall in einem ersten Schritt mit einem Komptech Terminator 5000S bei 60 % Leistung und geschlossenem Schnittspalt vorzerkleinert. Die Beschickung des Shredders erfolgte mittels Radlader. Nach dem Shredder gelangt das Material in den Multimeasure, der aufgrund seines schwenkbaren Austragsbandes für die Probenahme ausgewählt wurde. Die Probenahme erfolgte alle 60 s durch hin- und zurückschwenken des Austragsbandes über die Schaufel eines zweiten Radladers (links im Bild). Dieser Vorgang erzeugt somit zwei Inkremente einer Probe. Nach drei Schwenkvorgängen, also sechs Inkrementen einer Probe in der Laderschaufel, wurde der Inhalt der Laderschaufel in sechs 240 l Mülltonnen umgefüllt. Dieser Vorgang wurde für alle Proben E1 bis E10 durchgeführt und im Anschluss ein weiteres Mal wiederholt, sodass jede Probe von E1 bis E10 aus jeweils 12 Inkrementen besteht. Die fertigen Proben wurden

am Ende gewogen und für die spätere Siebung vor dem AVAW-Technikum gelagert. Innerhalb von zwei Stunden und 10 Minuten Versuchszeit (mit Stillständen) wurden insgesamt 31,8 t Abfall in den Shredder aufgegeben, die Gesamtmenge der Proben E1 bis E10 betrug schlussendlich 1545,5 kg.



Abbildung 19: Versuchsaufbau bei der Firma Mayer Recycling; von rechts nach links: Aufgabe mit Radlader, Terminator, Multimeasure, Radlader für Probenahme, Quelle: Sandra Viczek

2.3 Siebung

Nach der Probenahme am Standort der Firma Mayer Recycling erfolgte die Siebung der Proben E1 bis E10 in unmittelbarer Nähe im Technikum des AVAW.

Durchführung der Siebung:

Die Siebung erfolgte vom größten zum kleinsten Siebschnitt. Um den Sieb Ablauf zu optimieren, wurden zuerst sämtliche Originalproben mit dem Siebschnitt 200 mm gesiebt. Im Anschluss erfolgte die Siebung aller Siebdurchgänge < 200 mm mit dem nächstkleineren Durchmesser. Die Massen der Siebdurchgänge und -überläufe wurden mit den Waagen der Firma G&G (Abbildung 9) und der Schwerlastwaage der Firma Kern (Abbildung 10) bestimmt.

Zu Beginn wurde die zu siebende Probe von den Abfallbehältern in Mörtelwannen umgefüllt, da diese, bezüglich der Befüllung des Siebes, besser handhabbar sind. Die Dauer eines Siebintervalls beträgt 90 s. Während einem Siebintervall bewegt sich das Sieb mit 5 U/min. Durchgeführt wurden zwei Intervalle, die Siebdauer betrug insgesamt also 180 s. Die Menge an Abfall, mit dem das Sieb für einen Siebvorgang beladen wurde, war variabel und hauptsächlich von Erfahrungswerten abhängig. Wichtig war hier, das Sieb nicht zu überladen, da sonst Probenmaterial über die Sieböffnung herausfallen konnte. Weiters war

es möglich, dass der Antriebsmotor überlastete und das Sieb nicht mehr im Stande war, sich von selbst loszudrehen. Um ein übermäßiges Herausfallen des Abfalls zu vermeiden, wurde an der Sieböffnung eine Blende montiert, zudem war das Sieb leicht nach innen geneigt, siehe Abbildung 15. Während des Siebvorgangs wurden zwei Mörtelwannen unter die Öffnung gestellt, um herausfallendes Material aufzufangen. Dieses wurde dann wieder in die Siebtrommel aufgegeben. Bei Proben, welche Abfallbestandteile mit großen Volumina und kleinem Gewicht beinhalteten, konnte das Sieb zumeist mit zwei Mörtelwannen beladen werden. Im weiteren Siebverlauf änderte sich die Probenzusammensetzung Richtung Abfallbestandteile mit kleineren Volumina, aber größerem Gewicht. Gleichzeitig nahm die zu siebende Probenmenge ab, da der Siebdurchgang erneut mit dem nächstkleineren Durchmesser gesiebt wurde. Nach erfolgter Siebung wurde der Inhalt der Trommel (Siebüberlauf) händisch in Mörtelwannen entleert. Weiters erfolgte eine Entfernung der Reste, welche in der Trommel verblieben waren (meist eingeklemmt zwischen Siebplatten und Rahmen), sowie von Gegenständen, die sich während dem Siebvorgang um die Trommel gewickelt hatten (div. Bänder oder Wollfäden). Der Inhalt der Wannen (Siebüberlauf) wurde regelmäßig fotografiert, immer gewogen und danach in Müllsäcke verpackt. Die Müllsäcke wurden wiederum in Mülltonnen im Außenbereich gelagert. Je nach Bedarf, bzw. nachdem alle Teile einer Probe gesiebt wurden, erfolgte die Entleerung des Siebdurchgangs aus der Holzwanne. Mit Besen und Schaufel wurden kleine Abfallbestandteile und Staub, welche sich in der Holzwanne und um die Siebtrommel angesammelt hatten, aufgekehrt. Der letzte Arbeitsschritt war eine Wiegung des Siebdurchgangs, gefolgt von einer Lagerung in Abfallbehältern bis zur nächstkleineren Siebung.

2.4 Allgemeine Sortierung

Nach der Siebung der Abfallproben E1 bis E10 folgte eine allgemeine Handsortierung der Fraktionen > 20 mm auf einem aufstellbaren Sortiertisch. Diese Tätigkeit erfolgte wieder, wie bereits zuvor die Siebung, am Technikum Standort.

2.4.1 Durchführung der allgemeinen Sortierung

Die zuvor gesiebten und in Abfallbehältern zwischengelagerten Proben wurden vor der Sortierung, zur besseren Handhabung, wieder in Mörtelwannen umgefüllt. Diese Mörtelwannen konnten, im Gegensatz zu den Abfallbehältern, relativ einfach auf dem Sortiertisch entleert werden. Zudem war es bei einigen Abfallproben ohnehin notwendig, diese aufgrund der großen Probenmenge vor der Sortierung aufzuteilen. Die jeweiligen Abfallbestandteile wurden in entsprechend gekennzeichnete Kübel aussortiert. Die Anordnung dieser weißen 10 l Behälter auf dem Tisch ist in Abbildung 16 ersichtlich. In Tabelle 4 sind die aussortierten Fraktionen und die ungefähre Anordnung der ihnen zugeordneten Probenkübel schematisch als Draufsicht auf den Sortiertisch dargestellt. Insgesamt wurde nach 18 unterschiedlichen Fraktionen aussortiert. Die Zusammensetzung dieser Fraktionen wird in Kapitel 3.3.1 ausführlich dargestellt. Die Kübel für die Fraktionen PPK und Verbund wurden aufgrund von Platzmangel, wie in Abbildung 16 zu sehen, leicht

versetzt auf die anderen Probenkübel gestellt. Der eigentliche Sortiervorgang von Hand erfolgte idealerweise mit vier Personen (P1 bis P4). Bei entsprechender Anordnung, zwei Personen oben, zwei unten, konnte weitgehend störungsfrei und zügig sortiert werden. Die Dauer der Sortierung der einzelnen Größenbereiche war sehr unterschiedlich. Allgemein war es so, dass größere Kornklassenbereiche (> 200 mm, 200 - 100 mm) teilweise innerhalb von 30 Minuten sortiert werden konnten. Beim kleinsten Größenbereich, der sortiert wurde (40 - 20 mm), konnte eine vollständige Sortierung hingegen bis zu zwei Arbeitstage dauern. Daher wurde abwechselnd eine große und eine kleine Abfallfraktion sortiert. Die vollständige Sortierung einer Probe nahm in etwa eine Arbeitswoche in Anspruch. Insgesamt wurde eine Probenmenge von 950,2 kg sortiert. Bei der allgemeinen Sortierung kam die Feinwaage der Firma Kern (Abbildung 8) und die Waage der Firma G&G (Abbildung 9) zum Einsatz. Durch die teils langen Sortierzeiten ist mit entsprechenden Wasserverlusten zu rechnen. Diese sind bei den kleineren Fraktionen mit längerer Sortierdauer tendenziell als größer einzuschätzen als bei sehr groben, schnell sortierbaren Fraktionen.

Tabelle 4: Sortierte Abfallarten und die Anordnung der zugehörigen Probenkübel auf dem Sortiertisch sowie die Arbeitspositionen

		P1		P2			
PET (Essig)		Textil	Sortierfläche		Holz		Tetra
Organik	Verbund	Verp. m. Inh.			KS 3D	PPK	Inert
Batterien		Metall			KS 2D		Gummi
Rest		PET (Getr.)			Schwarz		EAG
		P3		P4			

2.4.2 Verjüngung

Aufgrund der langen Dauer der Sortierung wurde für die Proben E5, E8 und E9 eine Verjüngung der Probenmenge durchgeführt. Die Verjüngung erfolgte auf dem Sortiertisch (ohne Probenkübel), dieser ist zu diesem Zweck mit Klebeband in 10 Bereiche unterteilt, zu sehen in Abbildung 16. Vor der Verjüngung wurde die jeweilige Probe gleichmäßig auf dem Sortiertisch verteilt. In Tabelle 5 sind die zu verjüngenden Korngrößenbereiche, sowie das Schema der Verjüngung dargestellt.

Tabelle 5: Verjüngungsschema für die Proben E5, E8 und E9

Verjungen	E5	E8	E9
100-80	6/10 behalten	5/10 behalten	5/10 behalten
80-60	5/10 behalten	5/10 behalten	5/10 behalten
60-40	5/10 behalten	erst 6/10 dann 7/10 behalten	erst 5/10 dann 7/10 behalten
40-20	5/10 behalten	erst 6/10 dann 7/10 behalten	erst 5/10 dann 7/10 behalten

Das Schema „5/10 behalten“ bedeutet, dass von 10 Teilen einer Probe 5 Teile behalten und 5 Teile verworfen wurden. Beim Schema „erst 6/10 dann 7/10“ wurden zuerst 6 von 10 Teilen verjüngt und behalten. Diese 6 Teile wurden wieder gleichmäßig auf den Sortiertisch über alle 10 Bereiche verteilt. Anschließend erfolgte eine weitere Verjüngung, bei der schließlich 7 von 10 Teilen behalten wurden und diese danach die neue, zu sortierende Probenmenge bildeten. Die Auswahl, der zu behaltenden oder verwerfenden Probenteile, wurde mittels einer Tabelle mit Zufallszahlen bewerkstelligt. Verworfenen Probenteile wurden aufbewahrt und als Rückstellproben gelagert bzw. den chemischen Analysen zugeführt.

2.5 Chemische Analysen

Die sortierten Fraktionen wurden wieder vermengt und als Korngrößenfraktionen > 200, 200 – 100, 100 – 80, 80 – 60, 60 – 40, 40 – 20, 20 – 10, 10 – 5 und < 5 mm der Proben E1 bis E10 separat vom akkreditierten Labor des AVAW chemisch analysiert. Der Wassergehalt wurde nach EN 14346 (Verfahren A) bei 105°C bestimmt. Der Heizwert wurde nach DIN 51900-1 bestimmt. Harte Störstoffe wurden aus der Probe entfernt und nicht mit einberechnet.

2.6 Sortierung nach Kunststoffarten

Im Anschluss an die allgemeine Handsortierung am Technikum in St. Michael erfolgte eine maschinelle Sortierung mittels NIR-Technik der Kunststofffraktionen 2D und 3D im Altlastenlabor des AVAW-Instituts. Für die Proben E2, E3, E6, E7 und E10 wurden dafür die Korngrößenbereiche > 200 mm bis 80 – 60 mm nach den Kunststoffarten PE, PP, PET, PS und PVC sortiert. Die Korngrößenbereiche 60 – 40 mm und 40 - 20 mm konnten mit der maschinellen Sortierung nicht zuverlässig getrennt werden. Auf ihre Sortierung wurde daher verzichtet.

Durchführung der maschinellen Sortierung mittels NIR-Technik:

Bevor mit der Sortierung begonnen werden konnte, musste erst den Kunststoffen spezifische Farbspektren zugeordnet werden, zu sehen in Tabelle 6. Anhand dieser war es dann

möglich, sie zu erkennen und auszusortieren. Das erfolgte mit jenem Rezept, welches bereits von Möllnitz et al. (2020) erfolgreich zur Bestimmung von Kunststoffen in Gewerbeabfällen verwendet wurde. Als Probenbehälter für die aussortierten Fraktionen kamen erneut Mörtelwannen unterschiedlichster Größen zum Einsatz. Diese wurden vor den Versuchen gewogen und mit den Fraktionen und ihnen zugeordneten Farben entsprechend beschriftet. Zum Einsatz kam hier die Laborwaage der Firma G&G, siehe Abbildung 11. Je nach auszusortierender Fraktion wurde die Gewichtung der Kunststoffe untereinander verändert, um die gewünschte Fraktion zuverlässiger abtrennen zu können.

Tabelle 6: Zuordnung der Kunststoffe zu spezifischen Farbspektren

Zuordnung der Kunststoffe zu spezifischen Farbspektren									
Fraktion	PE	PP	PET	PS	PVC	Verbund	NI (nicht identifiziert)	Rest	Start
Farbe	Rot	Grün	Blau	Weiß	Violett	-	-	-	-

Für diese Versuche erfolgte die Einstellung des Luftdrucks für die Düsenleiste auf drei Bar. Die zu sortierende Probe wurde zu Beginn in die mit Start gekennzeichnete Mörtelwanne umgefüllt. In weiterer Folge dann die Wanne gewogen, fotografiert und in den Aufgabetrichter entleert. Gearbeitet wurde teilweise mit, teilweise ohne Rüttelwanne für den Probentransport. Nachfolgend sind die Arbeitsabläufe beim Sortieren der 2D- und 3D-Fraktionen kurz beschrieben:

- 2D-Fraktion:** Die Reihenfolge der aussortierten Fraktionen war PE, PP, PET, PS und zuletzt PVC. Es wurde also zuerst PE abgetrennt. Der verbleibende Rest wieder in den Aufgabetrichter gegeben und PP aussortiert. Das Prozedere wurde bis zur letzten Fraktion PVC wiederholt, bis nur noch eine kleine Restfraktion übrigblieb. Neben diesen fünf KS-Fraktionen erfolgte noch die Abtrennung einer Verbund- und einer NI-Fraktion. Die Sortierreihenfolge der Kunststoffe ergab sich aus Erfahrungswerten, da sich die 2D-Fraktionen im Allgemeinen (über alle Korngrößenbereiche) zu einem großen Teil aus PE zusammensetzten. So konnte gleich zu Beginn viel Probenmaterial aussortiert werden, was die nachfolgenden Schritte erleichterte bzw. beschleunigte.
- 3D-Fraktion:** Hier änderte sich die Reihenfolge der aussortierten Fraktionen leicht. Nach einigen Durchgängen stellte sich heraus, dass die 3D-Fraktionen zu einem großen Teil aus PS bestehen. Es wurde also die Reihenfolge PS, PE, PP, PET und PVC beim Aussortieren der Fraktionen verfolgt. Das hier durchgeführte Prozedere war dasselbe, wie bei der 2D-Fraktion.

Am Ende der maschinellen Sortierung wurde der Sortierrest, der nicht zuverlässig erkannt werden konnte, noch händisch nachsortiert, sowie die Probenbehälter gewogen, fotografiert und in ihre ursprünglichen Müllsäcke verpackt. Aus welchen Abfällen sich die Fraktionen zusammensetzen ist in Kapitel 3.4.1 zu sehen.

2.7 Unterschiedliche Szenarien zur Abfallzusammensetzung

In diesem Kapitel wird der Einfluss von bestimmten Recyclingraten auf die Abfallzusammensetzung untersucht. Weiters wird noch ein Worst-Case Szenario betrachtet. Ausgangsmaterial für die Betrachtung ist der zuvor gesiebte, händisch und NIR-sortierte gemischte Gewerbeabfall. Der betrachtete Abfall wurde noch keiner abfalltechnischen Behandlung in einer Anlage unterzogen, daher wird hier die Annahme einer aktuellen Recyclingrate von 0 % als Ausgangswert für die Betrachtung von unterschiedlichen Szenarien getroffen. Eine Aufteilung der sortierten Fraktionen und ihre Einteilung für die Betrachtung der Szenarien findet sich in Abbildung 20. Im linken Bereich sind alle Fraktionen aus der allgemeinen Sortierung ersichtlich. Die Fraktionen 2D und 3D wurden mit Hilfe der NIR-Sortierung noch weiter unterteilt in PE, PP, PET, PS, PVC, Verbund, NI und Rest. Im mittleren Bildabschnitt sind alle Fraktionen dargestellt. Mehrfach vorkommende werden zusammengefasst. Rechts in der Abbildung erfolgt die Einteilung in eine EBS-Fraktion (oben) und in Fraktionen, die aussortiert werden (unten). Bei den EBS-Fraktionen wird auf eine Unterteilung in 2D und 3D während der Darstellung unterschiedlicher Szenarien verzichtet. Es handelt sich hier um einen gemischten Produktstrom, bevor er im Zuge der EBS-Produktion technische Aufbereitungsschritte durchläuft. Die Aufteilung in eine Leichtfraktion (2D) und eine Schwerfraktion (3D) erfolgt während des Produktionsprozesses in der Regel durch einen Windsichter. Im Detail werden nur die von einer erhöhten KS-Recyclingrate betroffenen Kunststoffe PE, PP, PET und PS dargestellt. Alle übrigen EBS-Fraktionen werden in einer Rest-Fraktion zusammengefasst. Die Betrachtung der Kornform erfolgt bei der Zuordnung der untersuchten Abfallproben zu möglichen Einsatzorten im Produktionsverfahren von EBS.

Der Bezug der betrachteten Szenarien erfolgt auf eine EBS produzierende Anlage. Aus dieser Sicht ist eine erhöhte Recyclingrate nachteilig, da hochwertiges Material für die Produktion von EBS verloren geht.

	Fraktion	Masse [kg]	Anteile [%]
KS 2D	PE	85,7	9,0%
	PP	9,3	1,0%
	PET	1,0	0,1%
	PS	1,0	0,1%
	PVC	0,2	0,0%
	Verbund	2,7	0,3%
	NI	6,4	0,7%
	Rest	6,1	0,6%
KS 3D	PE	26,8	2,8%
	PP	38,6	4,1%
	PET	36,9	3,9%
	PS	22,5	2,4%
	PVC	14,2	1,5%
	Verbund	7,0	0,7%
	NI	55,5	5,8%
	Rest	4,7	0,5%
	Schwarz	102,7	10,8%
	PET-Getränke	13,4	1,4%
PET-Essig	0,8	0,1%	
Tetra	2,4	0,3%	
Gummi	6,5	0,7%	
Verpackung mit Inhalt	1,6	0,2%	
Verbund	94,2	9,9%	
EAG	6,8	0,7%	
Batterien / Akkus	0,6	0,1%	
Holz	78,1	8,2%	
PPK	102,6	10,8%	
Textil	52,3	5,5%	
Metall	75,3	7,9%	
Inert	67,3	7,1%	
Rest	23,8	2,5%	
Organik	3,2	0,3%	
Summe	950,2	100,0%	

Fraktion	Masse [kg]	Anteile [%]
PE	112,5	11,8%
PP	47,9	5,0%
PET	52,1	5,5%
Holz	78,1	8,2%
PPK	102,6	10,8%
PS	23,5	2,5%
Tetra	2,4	0,3%
Textil	52,3	5,5%
Verbund	103,9	10,9%
NI	61,9	6,5%
PVC	14,5	1,5%
Schwarz	102,7	10,8%
Gummi	6,5	0,7%
Verpackung mit Inhalt	1,6	0,2%
EAG	6,8	0,7%
Batterien / Akkus	0,6	0,1%
Metall	75,3	7,9%
Inert	67,3	7,1%
Organik	3,2	0,3%
Rest	34,6	3,6%
Summe	950,2	100,0%

Fraktion	Masse [kg]	Anteile [%]
PE	112,5	13,9%
PP	47,9	5,9%
PET	52,1	6,4%
PS	23,5	2,9%
Rest	571,63	70,8%
Summe	807,6	100,0%

Fraktion	Masse [kg]	Anteile [%]
Metall	75,3	52,8%
Inert	67,3	47,2%
Summe	142,6	100,0%

Abbildung 20: Aufteilung der sortierten Fraktionen und Einteilung für die Betrachtung der folgenden Szenarien, links: Fraktionen aus der allgemeinen und NIR-Sortierung, Mitte: Zusammenfassung aller mehrfach vorkommenden Fraktionen, rechts: Einteilung in eine für die Produktion von EBS interessante Fraktion (oben) und eine Fraktion, die aussortiert wird (unten), die Massen sind auf die Originalsubstanz (OS) bezogen

Die Gesamtmasse der sortierten Fraktionen beträgt 950,2 kg. Diese teilt sich auf in eine Fraktion mit 142,6 kg, welche aussortiert wird und in die EBS-Fraktion mit 807,6 kg. Für die Betrachtung der weiteren Szenarien wird lediglich die EBS-Fraktion herangezogen. Neben dieser Gesamtbetrachtung der sortierten Fraktionen erfolgt noch eine separate Betrachtung der Proben E1, E4 und E5. Diese sind in dieselben Fraktionen unterteilt wie die Gesamtprobe, es ändert sich jedoch ihre Gesamtmasse und die prozentuale Zusammensetzung von PE, PP, PET, PS sowie der Rest-Fraktion. Auch hier wird die Metall- und Inert-Fraktion entfernt. Ihre Massen sind ebenfalls auf die OS bezogen. Neben den sortierten Korngrößenbereichen > 200 mm bis 40 – 20 mm fließen in die Gesamtmasse der Proben E1, E4 und E5 noch die Masse der nicht sortierten Kornklassen 20 – 10, 10 – 5 und < 5 mm mit ein. Dieser Schritt erfolgt aufgrund der noch folgenden Berechnung des Heizwertes. Die nicht sortierten Klassen werden der Rest-Fraktion zugeordnet.

Einfluss von unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten:

Die in Österreich zu erreichende Recyclingrate von Gewerbeabfällen (stoffliche Verwertung) ist, wie in Kapitel 1.2 bereits erwähnt, die kommenden Jahre zu erhöhen. Folglich wird untersucht, wie sich bestimmte Recyclingraten von Kunststoffen auf die Zusammensetzung von EBS auswirken. Zuerst wird die Gesamtprobe betrachtet, im Anschluss daran wird noch auf die Einzelproben E1, E4 und E5 eingegangen. Dafür werden Szenarien, in denen 0 %

(Ausgangszusammensetzung des Gewerbeabfalls), 25 %, 50 % und 75 % der Kunststoffe aus dem Abfallstrom entfernt werden, betrachtet. Zusätzlich erfolgt noch die Darstellung eines Worst-Case Szenarios, bei dem sämtliche recyclingfähige KS-Fractionen entfernt werden. Die Betrachtung des Einflusses dieser Recyclingraten auf die Zusammensetzung des Abfalls erfolgt anhand der für die Produktion von EBS interessanten Fraktion (Abbildung 20, rechts oben).

Berechnung der ausgeschleusten Mengen:

Wie sich eine Erhöhung der Recyclingrate auf die Menge der Kunststoffe in der Probe auswirkt, wird anhand von PE beispielhaft dargestellt:

- **0 % Recycling:** keine Veränderung
- **25 % Recycling:** $PE_{25\%} = PE_{0\%} * 0,75$
- **50 % Recycling:** $PE_{50\%} = PE_{0\%} * 0,5$
- **75 % Recycling:** $PE_{75\%} = PE_{0\%} * 0,25$
- **Worst-Case:** kein PE mehr in der Probe

Es wird der Einfachheit halber angenommen, dass alle Kunststoffe in der Probe gleichmäßig entfernt werden. Die zuvor dargestellten Berechnungen gelten also für alle Kunststoffe PE, PP, PET und PS in der Zusammensetzung.

2.8 Änderungen der Heizwerte

Nachfolgend wird in diesem Kapitel auf die Änderung des wichtigsten Parameters für EBS eingegangen, welcher sich aus erhöhten Recyclingraten ergibt, dem Heizwert. Grundlage für die Betrachtung sind die Ergebnisse zu Fraktionszusammensetzung und Massegehalt aus Kapitel 3.5. Der für die Betrachtung der Änderung der Parameter herangezogene Heizwert der einzelnen KS-Fractionen stammt aus bekannter Literatur. Als Quelle dient hier das Paper von Weissenbach und Sarc (2022). In der Tabelle 7 sind die verwendeten Heizwerte dargestellt. Diese Werte sind jene, welche aus den Untersuchungen von Weissenbach und Sarc hervorgingen. Die in dem Paper angeführten Daten beziehen sich auf die Trockensubstanz (TS). Der für EBS wichtige Heizwert bezieht sich jedoch auf die Originalsubstanz (OS). Da Kunststoffe nach Engel und Hannover (1990) hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen und anders als Papier meist kein Wasser aufsaugen, sondern mit Ausnahme gefüllter Flaschen oder zusammengeknüllter Folien hauptsächlich oberflächlich mit Wasser benetzt sind, wird zur Vereinfachung angenommen, dass der Wassergehalt der Kunststofffraktion gering und somit der Unterschied zwischen dem Heizwert der Kunststoffe bezogen auf OS und TS vernachlässigbar ist. Der Bezug auf die OS erfolgt, da die für die Berechnung verwendeten Massen aus der Sortierung, sowie der Heizwert von Ersatzbrennstoffen ebenfalls auf die OS bezogen sind.

Tabelle 7: Heizwerte aus der Literatur, Quelle: Weissenbach und Sarc (2022)

Fraktion	Heizwert [MJ/kg OS]
PE	41,1
PP	41,9
PET	21,6
PS	37,0

2.8.1 Berechnung der Heizwerte der Gesamtproben

Die Heizwerte der Gesamtproben wurde aus den Heizwerten der einzelnen Korngrößen und deren Masseanteilen in der jeweiligen Probe, beides bezogen auf die Originalsubstanz, nach folgender Formel 2 berechnet:

$$LHV_{ges} = \frac{\sum_i LHV_i * m_i}{\sum_i m_i} \quad (2)$$

Der Index i steht für die Kornklassenbereiche > 200 mm bis < 5 mm.

Anmerkung: Bei der Bestimmung des Heizwertes der Proben durch das Laborteam des AVAW wurden harte Störstoff, welche nicht mit einer Schneidmühle zerkleinert werden konnten, entfernt. Das betrifft vor allem die Fraktionen Metall, Inert, Batterien und EAG. Metall und Inert werden auch in einer EBS-Produktionsanlage entfernt. Sollten Batterien und EAG in die EBS-Fraktion gelangt sein, so ist ihr Einfluss vernachlässigbar, da sie nur einen Anteil von 0,1 % bzw. 0,7 % an der Gesamtmasse haben.

2.8.2 Heizwert bei unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten

In diesem Kapitel erfolgt nun die Betrachtung des Einflusses von bestimmten Recyclingraten auf den Heizwert der Proben E1, E4 und E5. Wie in Kapitel 2.7 werden hierfür wieder die Szenarien mit 0, 25, 50 und 75 %-Recyclingrate, neben dem Worst-Case Szenario, als Beurteilungsgrundlage verwendet. Die Berechnung erfolgt nach Formel 3:

$$LHV_{Recyclingrate} = \frac{\sum_i LHV_i * m_i - \sum_f LHV_{f,entf} * m_{f,entf}}{\sum_i m_i - \sum_f m_{f,entf}} \quad (3)$$

Auch hier steht der Index i für die Kornklassenbereiche > 200 mm bis < 5 mm. Der Index f steht für die vier KS-Fraktionen PE, PP, PET und PS, welche entfernt werden. Bei der Berechnung ist zu beachten, dass $m_{f,entf}$ für die Masse der beim jeweiligen Szenario entfernten KS-Fraktion steht.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Probenahme

Die Ergebnisse der Probenahme für die Proben E1 bis E10, bestehend aus jeweils 12 Inkrementen, sind in der folgenden Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Ergebnis der Probenahme für die Proben E1 bis E10

Probenahme	
Probe	Masse [kg]
E1	203,0
E2	114,2
E3	160,6
E4	84,9
E5	170,9
E6	127,3
E7	155,1
E8	177,9
E9	226,8
E10	125,0
Summe	1545,5

3.2 Siebung

3.2.1 Ergebnis

Die Ergebnisse einer Siebung werden anhand von Fotos der Probe E7, sowie als Summenkurve abgebildet. Eingeteilt werden diese über die verwendeten Siebschnitte, abgekürzt mit S.S. Bei den folgenden Bildern zu den jeweiligen Siebschnitten handelt es sich immer um den Siebüberlauf. In Tabelle 9 ist der Zusammenhang zwischen den verwendeten Siebschnitten und den dadurch entstehenden Korngrößenbereichen dargestellt.

Tabelle 9: Zusammenhang Siebschnitt und entstehende Korngrößenbereiche

Siebschnitte [mm]											
S.S.200		S.S.100		S.S.80		S.S.60		S.S.40		S.S.20	
> 200	200 - 100	100 - 80	80 - 60	60 - 40	40 - 20					< 20	
Korngrößenbereiche [mm]											

S.S.200:

Ein Auszug der Ergebnisse der Siebung bei S.S.200 ist in Abbildung 21 ersichtlich. Eine Siebung mit der Maschenweite 200 mm führte zu folgenden Ergebnissen:

- Siebüberlauf: Für den Siebüberlauf folgte die Korngrößeneinteilung > 200 mm.
- Siebdurchgang: Der Durchgang wurde in die Korngröße < 200 mm eingeteilt.



Abbildung 21: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 200 der Probe E7, Quelle: Martin Berger

S.S.100:

Für den Siebschnitt S.S.100 sind die Ergebnisse in Abbildung 22 dargestellt. Hier führte eine Siebung mit der Maschenweite 100 mm zu:

- Siebüberlauf: Es folgte die Korngrößeneinteilung 200 - 100 mm.
- Siebdurchgang: Dieser wurde dem Bereich < 100 mm zugeordnet.



Abbildung 22: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 100 der Probe E7, Quelle: Martin Berger

S.S.80:

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse für den Schnitt S.S.80 ersichtlich. Eine Siebung bei der Maschenweite 80 mm führte zu:

- Siebüberlauf: Eingeteilt in den Siebschnitt 100 - 80 mm.
- Siebdurchgang: Wurde in den Größenbereich < 80 mm eingeteilt.



Abbildung 23: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 80 der Probe E7, Quelle: Martin Berger

S.S.60:

Die Ergebnisse für den Siebschnitt S.S.60 sind in Abbildung 24 dargestellt. Bei der Maschenweite 60 mm führte ein Siebvorgang zu:

- Siebüberlauf: Wurde in den Korngrößenbereich 80 - 60 mm eingeteilt.
- Siebdurchgang: Der Durchgang wurde dem Bereich < 60 mm zugeordnet.

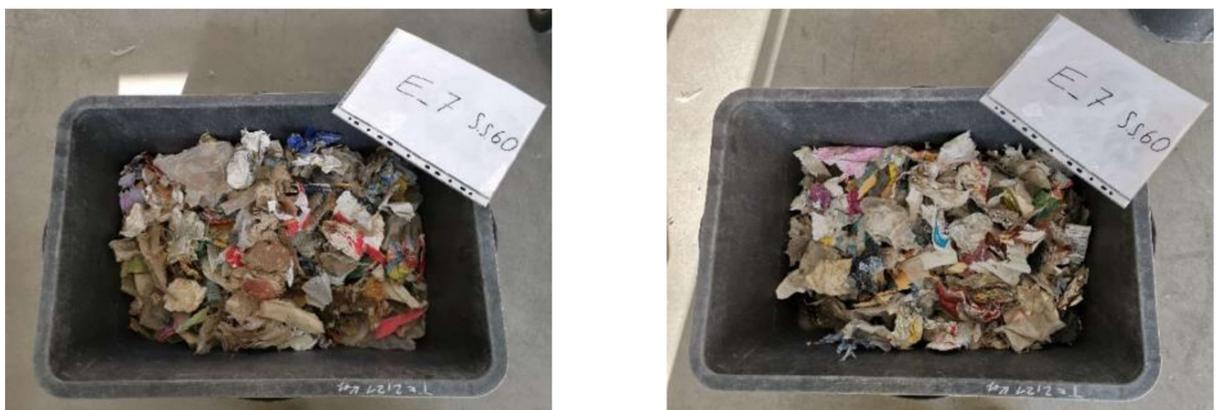


Abbildung 24: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 60 der Probe E7, Quelle: Martin Berger

S.S.40:

Ein Teil der Siebergebnisse ist in Abbildung 25 ersichtlich. Die Maschenweite 40 mm führte bei der Siebung zu:

- Siebüberlauf: Wurde in den Siebbereich 60 - 40 mm eingeteilt.
- Siebdurchgang: Eingeteilt in den Bereich < 40 mm.



Abbildung 25: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 40 der Probe E7, Quelle: Martin Berger

S.S.20 und darunter:

Bei diesem Siebschnitt ist das Ergebnis in Abbildung 26 dargestellt. Der Siebvorgang bei der Maschenweite 20 mm führte zu:

- Siebüberlauf: Eingeteilt in den Bereich 40 - 20 mm.
- Siebdurchgang: Wurde in den Korngrößenbereich < 20 mm eingeteilt.



Abbildung 26: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 20 der Probe E7, Quelle: Martin Berger

Die verbleibenden Abfallproben wurden noch mit den Siebschnitten S.S.10 und S.S.5 gesiebt. Daraus ergaben sich die zugehörigen Kornklassenbereiche 20 - 10 mm, 10 - 5 mm und < 5 mm. Diese Proben wurden allerdings direkt ins Labor zur Analyse gebracht, da eine händische Sortierung aufgrund der kleinen Partikelgröße nicht möglich gewesen wäre.

Sieberggebnis für alle Proben in Form von Summenkurven:

In Abbildung 27 ist das Ergebnis der Siebung für alle Proben E1 bis E10 in Form von Summenkurven dargestellt. Die Anteile der Kornfraktionen für jede einzelne Probe in tabellarischer Form sind Anhang I bis V zu entnehmen.

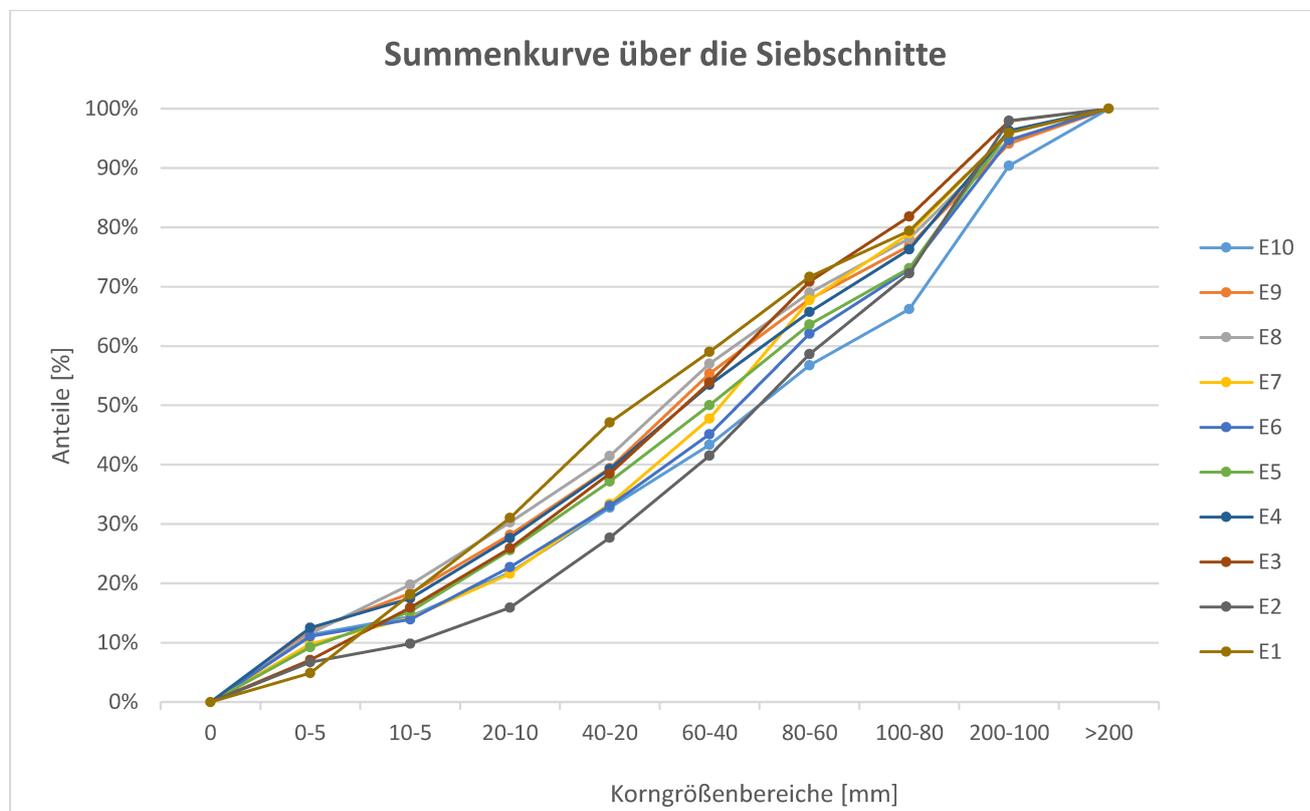


Abbildung 27: Summenkurven für alle Proben über die Siebschnitte, Quelle: Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger

3.2.2 Diskussion

Masseverlust:

- Entleeren der Abfallbehälter:

Bei diesem Vorgang konnte eine Kontamination der Probe mit Fremdmaterial sowie ein übermäßiger Verlust von Probenmaterial weitgehend vermieden werden. Bei Proben mit höherem Feuchtegehalt konnte es vorkommen, dass beim Entleeren der Abfallbehälter größere Probenmengen am Boden des Behälters zurückblieb. Diese Probenreste konnten jedoch mit dem entsprechenden Werkzeug (Harke) ohne Problem aus dem Behälter entfernt und der Siebung zugeführt werden.

- Siebvorgang:

Während der Rotation des Trommelsiebs wurden durch die Bewegung des Abfalls, je nach Feuchtegehalt, feine Abfallbestandteile, vorwiegend Staub, freigesetzt. Dieser konnte am Ende des Siebvorgangs einer Probe nur zum Teil, durch das Zusammenkehren von unmittelbaren Staubablagerungen um das Trommelsieb, wieder eingesammelt werden. Es kam also zu einem kleinen Masseverlust beim Sieben der Proben.

- Siebentleerung (Siebüberlauf):

Bei der Entleerung des Siebes ging es hauptsächlich darum, eingeklemmte Teile zu entfernen. Speziell bei kleinen Abfallfraktionen war dies mitunter aufwändig und nicht immer vollständig möglich. Es kam also auch hier zu einem kleinen Verlust von Probenmaterial.

- Entleerung der Holzbox (Siebdurchgang):

Beim Entleeren der Holzbox bereitete das Einsammeln der größeren Abfallfraktionen keine Probleme. Es war hauptsächlich die feine Abfallfraktion, welche aufwändiger entfernt werden musste. Auch hier blieb nur eine geringe Menge an Staub zurück. Es kam also zu keinen großen Verlusten von Probenmaterial.

Die gesamte Probenmasse betrug vor dem Siebvorgang 1545,5 kg. Nach dem Sieben waren noch 1454,1 kg Probenmasse vorhanden. Der Verlust von Probenmaterial durch den Siebvorgang von 91,4 kg bzw. 5,9 %, hielt sich über alle Siebvorgänge also in Grenzen. Der Masseverlust setzt sich zusammen aus Verlust von feiner Abfallfraktion, hauptsächlich Staub, sowie Verlust von Feuchtigkeit während der Probenlagerung und dem Siebvorgang.

Trennschärfe der Siebschnitte:

Während des Siebvorganges kam es gelegentlich vor, dass Abfallbestandteile mit bestimmten geometrischen Dimensionen (längliche Form, geringer Durchmesser, z.B.: Rohre, stangenförmige Gegenstände) durch, für sie eigentlich zu schmale, Sieböffnungen gelangten. Es war also keine zu 100 % korrekte Einteilung in Kornklassenbereiche möglich.

3.3 Allgemeine Sortierung

3.3.1 Ergebnis

Die Ergebnisse der allgemeinen Sortierung werden, wie bereits bei der Siebung, anhand von Fotos der Probe E7 dargestellt. Dies erfolgt für die Fraktionen > 200 mm bis 40 - 20 mm. Weiters erfolgt die Auswertung der allgemeinen Sortierung in Tabelle 10. Die 18 Fraktionen setzen sich wie folgt zusammen:

- **Tetra:** Hauptsächlich Milch- und Getränkeverpackungen aus Tetrapack.

- **Inert:** Besteht überwiegend aus Glas, Steinen, Zementbrocken und Fliesenteilen.
- **Gummi:** Zum Großteil besteht die Fraktion aus Latexhandschuhen, weiters noch aus anderen nicht genau zuordenbaren gummiartigen Gegenständen.
- **EAG:** Abkürzung für Elektroaltgerät und setzt sich zusammen aus Platinen, elektronischen Bauteilen, Kabeln (Isolierung & Draht) sowie elektronischen Kleinstgeräten.
- **PPK:** Steht für Papier, Pappe und Karton. Aussortiert wurden Kartonagenverpackungen, unterschiedlichste Papierseiten, Notizbücher, Verpackungen für Zement usw.
- **Holz:** Setzt sich aus vielen verschiedenen Arten zusammen. Massivholz, OBS-Platten, Spanpressplatten, Furniere usw.
- **KS 3D:** Bedeutet Kunststoff dreidimensional, besteht aus Rohren, Verpackungen, verdichteten Folien, stärkeren Kunststoffbändern und div. Kunststoffteile.
- **KS 2D:** Steht für Kunststoff zweidimensional, beinhaltet Folien (Verpackungen), Kunststoffnetze und dünne Fäden.
- **Schwarz:** Sämtliche schwarze oder zumindest sehr dunkle und graue Gegenstände wurden aussortiert (alle bis auf Metall), da bei einer späteren maschinellen Sortierung, mittels NIR-Gerät diese nicht erkannt und aussortiert werden können.
- **Textil:** Beinhaltet Kleidungsstücke, Teppichstücke, Leinenstoff und Tuchbestandteile.
- **Verpackung mit Inhalt:** Dazu zählen Tuben und Dosen mit Inhalt sowie Kunststofffolien mit Inhalt.
- **Metall:** Besteht aus verschiedensten metallischen Gegenständen wie, Drähte, Dosen, div. stückige Teile, Schrauben, Folien usw.
- **PET (Getränke):** Hauptsächlich Getränkeflaschen, zum Teil auch Joghurt- oder Milchbehälter.
- **Verbund:** Verschiedene Materialien wie beschichtete Folien, beschichtetes Papier, Teppichbeläge, Textilverbund mit Kunststoff und auch Verbund von unterschiedlichen Kunststoffen.
- **PET (Essig):** Gegenstände wie Shampooflaschen, Ölbehälter und verschiedene Kleinstkunststoffbehälter.
- **Organik:** Teilweise sehr unterschiedlich; Federn, Tannenzapfen, Stroh und kleine Äste.
- **Batterien:** Meist AAA-Batterien, aber auch verschieden Formen von Akkus.
- **Rest:** Hauptsächlich kleine Abfallbestandteile, welche am Ende der Sortierung auf dem Tisch verbleiben. Also Staub, Fäden, kleine Reststücke von Folien oder auch nicht identifizierbare Probenbestandteile.

> 200 mm:

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die aussortierten Fraktionen der Kornklasse > 200 mm ersichtlich. Aussortiert wurden die Fraktionen Holz, KS 2D, KS 3D, Metall, PET (Getr.), PPK, Rest, Schwarz, Textil und Verbund.

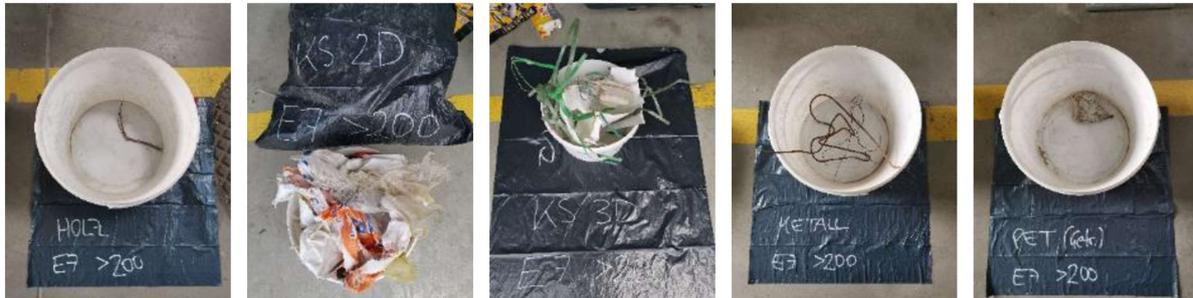


Abbildung 28: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Getr.), Metall, KS 3D, KS 2D, Holz, Quelle: Martin Berger



Abbildung 29: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verbund, Textil, Schwarz, Rest, PPK, Quelle: Martin Berger

200 - 100 mm:

Die aussortierten Fraktionen der Kornklasse 200 – 100 mm sind in Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Es wurden hier die Fraktionen EAG, Holz, KS 2D, KS 3D, Metall, Organik, PET (Getr.), PPK, Rest, Schwarz, Tetra, Textil und Verbund aussortiert.



Abbildung 30: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Metall, KS 3D, KS 2D, Holz und EAG, Quelle: Martin Berger



Abbildung 31: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Schwarz, Rest, PPK, PET (Getr.) und Organik, Quelle: Martin Berger



Abbildung 32: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verbund, Textil und Tetra, Quelle: Martin Berger

100 – 80 mm:

Die bei der Kornklasse 100 – 80 mm aussortierten Fraktionen sind in Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35 ersichtlich. In diesem Größenbereich wurden die Fraktionen EAG, Gummi, Holz, Inert, KS 2D, KS 3D, Metall, PET (Getr.), PPK, Rest, Schwarz, Tetra, Textil und Verbund aussortiert.



Abbildung 33: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: KS 2D, Inert, Holz, Gummi und EAG, Quelle: Martin Berger



Abbildung 34: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Rest, PPK, PET (Getr.), Metall und KS 3D, Quelle: Martin Berger



Abbildung 35: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verbund, Textil, Tetra und Schwarz, Quelle: Martin Berger

80 – 60 mm:

In der folgenden Abbildung 36, Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 sind die aussortierten Fraktionen des Größenbereichs 80 – 60 mm dargestellt. Aussortiert wurden hier die Fraktionen Batterien, EAG, Gummi, Holz, Inert, KS 2D, KS 3D, Metall, Organik, PET (Essig), PET (Getr.), PPK, Rest, Schwarz, Tetra, Textil, Verbund und Verpackung mit Inhalt.



Abbildung 36: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Inert, Holz, Gummi, EAG und Batterien, Quelle: Martin Berger



Abbildung 37: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Essig), Organik, Metall, KS 3D und KS 2D, Quelle: Martin Berger



Abbildung 38: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Tetra, Schwarz, Rest, PPK und PET (Getr.), Quelle: Martin Berger



Abbildung 39: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verpackung mit Inhalt, Verbund und Textil, Quelle: Martin Berger

60 – 40 mm:

Die aussortierten Fraktionen der Kornklasse 60 – 40 mm sind in Abbildung 40, Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 ersichtlich. Es wurden in dieser Klasse die Fraktionen Batterien, EAG, Gummi, Holz, Inert, KS 2D, KS 3D, Metall, Organik, PET (Getr.), PPK, Rest, Schwarz, Tetra, Textil, Verbund und Verpackung mit Inhalt aussortiert.



Abbildung 40: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Inert, Holz, Gummi, EAG, Batterien, Quelle: Martin Berger



Abbildung 41: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Getr.), Organik, Metall, KS 3D, KS 2D, Quelle: Martin Berger



Abbildung 42: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Textil, Tetra, Schwarz, Rest, PPK, Quelle: Martin Berger



Abbildung 43: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verpackung mit Inhalt und Verbund, Quelle: Martin Berger

40 – 20 mm:

In Abbildung 44, Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 sind die aussortierten Fraktionen der Kornklasse 40 – 20 mm dargestellt. Aussortiert wurden hier die Fraktionen EAG, Gummi, Holz, Inert, KS 2D, KS 3D, Metall, Organik, PET (Essig), PET (Getr.), PPK, Rest, Schwarz, Tetra, Textil, Verbund und Verpackung mit Inhalt.



Abbildung 44: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: KS 2D, Inert, Holz, Gummi, EAG, Quelle: Martin Berger



Abbildung 45: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Getr.), PET (Essig), Organik, Metall, KS 3D, Quelle: Martin Berger

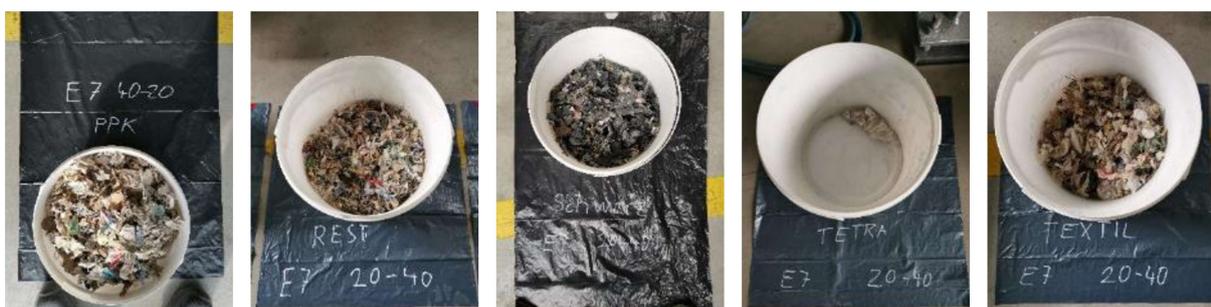


Abbildung 46: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Textil, Tetra, Schwarz, Rest, PPK, Quelle: Martin Berger



Abbildung 47: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verpackung mit Inhalt und Verbund, Quelle: Martin Berger

Tabellarische und grafische Auswertung der allgemeinen Sortierung für alle Proben E1 bis E10:

In der folgenden Tabelle 10 ist das Ergebnis der allgemeinen Sortierung als Mittelwert über alle Proben E1 bis E10 dargestellt. Die Sortierergebnisse für jede einzelne Probe sind Anhang VI bis VIII zu entnehmen. Die sortierten Massen der einzelnen Fraktionen sind über die Korngrößenbereiche verteilt aufgelistet. Ihre Summe dividiert durch die Gesamtmasse ergibt die Anteile in Prozent. Eine grafische Auswertung als Boxplot findet sich in Abbildung 48.

Tabelle 10: Ergebnis der allgemeinen Sortierung als Mittelwert über alle Proben aufgeteilt in Korngrößenbereiche und Fraktionen, Quelle: Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger

Anteile jeder Fraktion aus den Mittelwerten aller Proben								
in kg	>200	200-100	100-80	80-60	60-40	40-20	Summe	Anteile [%]
KS 2D	16,5	37,6	16,0	19,3	14,3	8,7	112,5	11,8%
KS 3D	13,8	55,0	31,8	41,9	33,7	29,9	206,2	21,7%
Schwarz	8,6	32,7	14,2	18,8	15,4	13,0	102,7	10,8%
PET-Getränke	0,0	3,9	4,8	3,7	0,9	0,1	13,4	1,4%
PET-Essig	0,0	0,2	0,1	0,4	0,1	0,0	0,8	0,1%
Tetra	0,0	0,7	0,7	0,7	0,2	0,0	2,4	0,3%
Gummi	2,9	0,6	0,4	1,3	1,0	0,4	6,5	0,7%
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	1,6	0,2%
Verbund	6,9	34,7	14,6	17,2	12,4	8,4	94,2	9,9%
EAG	0,0	1,6	0,9	2,4	0,9	0,8	6,8	0,7%
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,6	0,1%
Holz	0,3	11,5	10,5	24,4	17,8	13,5	78,1	8,2%
PPK	0,5	29,7	16,2	22,6	19,3	14,3	102,6	10,8%
Textil	11,5	20,7	6,2	7,1	4,7	2,0	52,3	5,5%
Metall	1,4	19,6	14,2	17,4	12,8	9,9	75,3	7,9%
Inert	0,0	4,9	5,3	15,0	15,8	26,2	67,3	7,1%
Rest	0,7	3,3	1,4	4,5	4,8	9,2	23,8	2,5%
Organik	0,0	1,6	0,3	0,5	0,3	0,5	3,2	0,3%
Summe	63,1	258,8	138,0	197,8	155,0	137,6	950,2	100,0%

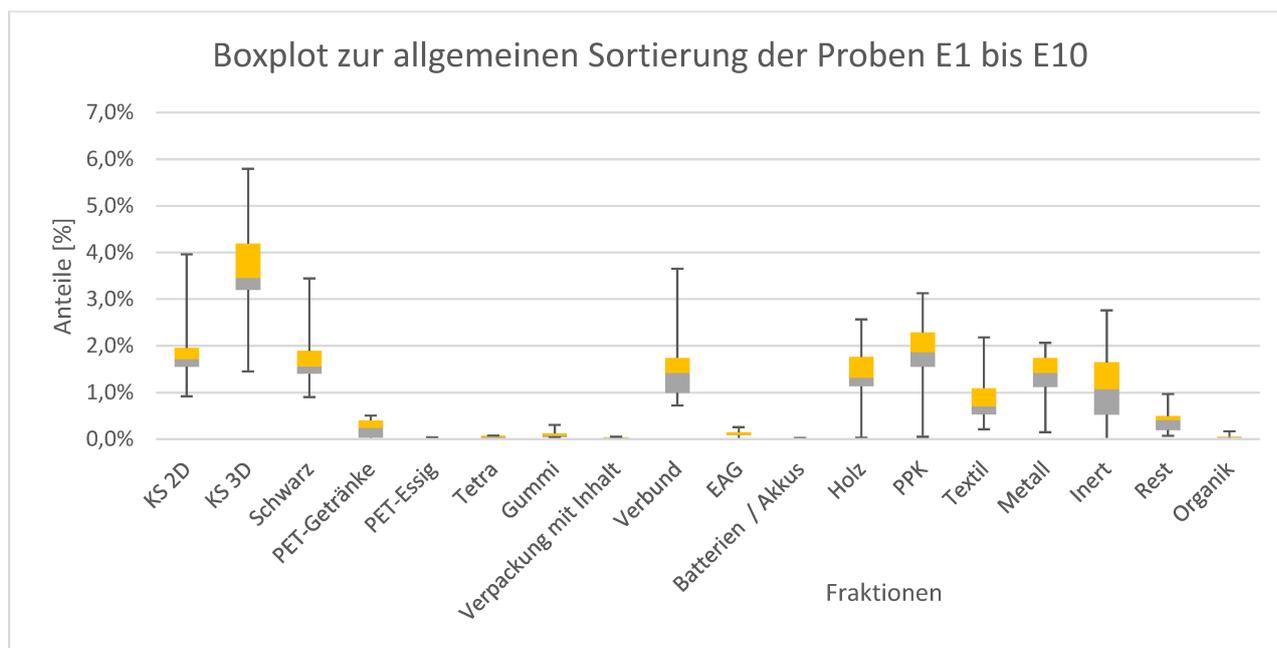


Abbildung 48: Grafische Auswertung als Boxplot der allgemeinen Sortierung

Analysiert wurden die prozentualen Anteile der Fraktionen an der Probe. Der dargestellte Boxplot ist 25 bis 75 Quantil und die Whiskers stellen die Maximal- und Minimalwerte dar. Der Übergang zwischen den beiden Balken bildet den Medianwert ab.

3.3.2 Diskussion

Masseverlust:

Von der ursprünglich genommen Probenmasse von 1545,5 kg wurden 950,2 kg an Material per Hand sortiert. Die Masseverluste der einzelnen Proben E1 bis E10 während dem Sortiervorgang sind in Anhang VI bis VIII ersichtlich. Einen Anteil am Masseverlust hatte auch der Verlust von Feuchtigkeit, während der Dauer der Sortierung, sowie die Probenlagerung nach dem Siebvorgang und vor dem Transport ins Labor zur Analyse. Hinzu kam noch ein Verlust von Masse durch das teilweise zurückbleiben von feiner Abfallfraktion, hier vor allem wieder Staub. Durch sorgfältiges Aufkehren von Staubresten wurde dieser jedoch minimiert.

Subjektive Entscheidung beim Sortiervorgang:

Wie bereits erwähnt, erfolgte die Sortierung der Abfallproben per Hand und von vielen unterschiedlichen Personen. Trotz Einschulung und im Verlauf des Sortiervorgangs erlangter Praxis und Erfahrungen, entschied jede Person für sich selbst, also subjektiv, um welche Abfallfraktion es sich handelte. Folglich kam es daher zu einem gewissen Anteil an fehlerhaft aussortierten Fraktionen, der sich nicht gänzlich verhindern ließ. Speziell bei nicht eindeutig identifizierbaren Proben war eine korrekte Aussortierung schwierig. Durch aufmerksames und sorgfältiges Arbeiten konnten fehlerhafte Zuordnungen zumindest verringert werden.

Fehlwürfe beim Sortieren:

Durch die kompakte Anordnung der Probenkübel auf dem Sortiertisch direkt nebeneinander und zum Teil auch versetzt übereinander, kam es zu einem gewissen Anteil an Fehlwürfen. Speziell wenn schnell und zügig gearbeitet wurde, war die Wahrscheinlichkeit von Fehlwürfen beim Sortieren erhöht. Die einzige Möglichkeit diesen Fehlwürfen entgegenzuwirken war auch hier ein, soweit möglich, sorgfältiges und aufmerksames Arbeiten.

3.4 Sortierung nach Kunststoffarten

3.4.1 Ergebnis

Anhand von Bildern der Probe E2 werden die Ergebnisse der NIR-Sortierung dargestellt. Aufgrund der Fülle an Bildern werden nur jeweils abwechselnd 2D- und 3D-Bilder der unterschiedlichen Kornklassen in diese Arbeit aufgenommen. Sortiert wurden die Kornklassen > 200 mm bis 80 – 60 mm. Eine Sortierung der Klassen 60 – 40 mm und 40 – 20 mm war sehr aufwändig und teilweise schlicht nicht möglich, daher wurde darauf verzichtet. Die maschinelle Sortierung nach Kunststoffarten brachte folgende Fraktionen hervor:

- **PE:** Polyethylen; besteht hauptsächlich aus Folien und Verpackungen
- **PP:** Polypropylen; zum Großteil Folien, Behälter und Verpackungsbänder
- **PET:** Polyethylenterephthalat; Folien, Flaschen und Verpackungen
- **PS:** Polystyrol; Becher, Verpackungsschüsseln und div. Schaumstoffe (EPS: Expanded Polystyrol oder auch „Styropor“)
- **PVC:** Polyvinylchlorid; Schutzhandschuhe, Verpackungen, dreidimensionale Bauteile
- **Verbund:** Nicht eindeutig identifizierbare oder zu trennende Gegenstände
- **NI:** Nicht identifizierbare Gegenstände
- **Rest:** Sortierrest und Nichtkunststoffe

Anmerkung: Die in den folgenden Abbildungen ersichtliche Beschriftung der Mörtelwanne mit NE (nicht erkannt) wird in dieser Arbeit, aufgrund der Verwechslungsgefahr mit NE (Nichteisenmetall), durch die Bezeichnung NI (nicht identifiziert) ersetzt.

> 200 mm 2D:

In der Abbildung 49 und Abbildung 50 sind die sortierten Fraktionen des Korngrößenbereichs > 200 mm abgebildet. Zu sehen ist die Startzusammensetzung die Fraktionen PE und PET sowie die Restfraktion.



Abbildung 49: Sortierte Fraktionen, links: Anfangszusammensetzung, rechts: PE, Quelle: Martin Berger



Abbildung 50: Sortierte Fraktionen, links: PET, rechts: Restfraktion, Quelle: Martin Berger

200 – 100 mm 3D:

Die sortierten Fraktionen der Kornklasse 200 – 100 mm 3D sind in der Abbildung 51, Abbildung 52, Abbildung 53, Abbildung 54, und Abbildung 55 dargestellt. Ersichtlich ist die Startzusammensetzung sowie die Fraktionen PP, PE, PS, PET, PVC, Verbund, NI und Rest.



Abbildung 51: Gesamte Startmasse vor der Sortierung (links und rechts), Quelle: Martin Berger



Abbildung 52: Sortierte Fraktionen, links: PE, rechts: PP, Quelle: Martin Berger



Abbildung 53: Sortierte Fraktionen, links: PET, rechts: PS, Quelle: Martin Berger



Abbildung 54: Sortierte Fraktionen, links: PVC, rechts: Verbund, Quelle: Martin Berger



Abbildung 55: Sortierte Fraktionen, links: NI, rechts: Rest, Quelle: Martin Berger

100 – 80 mm 2D:

Nachfolgend sind in der Abbildung 56, Abbildung 57, Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60 die Ergebnisse der Sortierung des Größenbereichs 100 – 80 mm dargestellt. Zu sehen sind die Fraktionen Start, PE, PP, PET, PS, PVC, Verbund, NI und Rest.



Abbildung 56: Sortierte Fraktionen, links: Startzusammensetzung, rechts: PE, Quelle: Martin Berger



Abbildung 57: Sortierte Fraktionen, links: PP, rechts: PET, Quelle: Martin Berger



Abbildung 58: Sortierte Fraktionen, links: PS, rechts: PVC, Quelle: Martin Berger



Abbildung 59: Sortierte Fraktionen, links: Verbund, rechts: NI, Quelle: Martin Berger



Abbildung 60: Restfraktion, Quelle: Martin Berger

80 – 60 mm 3D:

In der folgenden Abbildung 61, Abbildung 62, Abbildung 63, Abbildung 64 und Abbildung 65 sind für den Kornklassenbereich 80 – 60 mm die Ergebnisse der Sortierung ersichtlic. Sortiert wurden die Fraktionen Start, PE, PP, PET, PS, PVC, Verbund, NI und Rest.



Abbildung 61: Sortierte Fraktionen, links: Startfraktion, rechts: PE, Quelle: Martin Berger



Abbildung 62: Sortierte Fraktionen, links: PP, rechts: PET, Quelle: Martin Berger



Abbildung 63: Sortierte Fraktionen, links: PS, rechts: PVC, Quelle: Martin Berger



Abbildung 64: Sortierte Fraktionen, links: Verbund, rechts: NI, Quelle: Martin Berger



Abbildung 65: Restfraktion, Quelle: Martin Berger

3.4.2 Diskussion

Qualität der Partikelerkennung und Abtrennung:

Bei manchen Proben konnte der Umstand beobachtet werden, dass, trotz einer vermeintlich eindeutigen Identifizierung der Kunststoffart, kein Druckluftstoß zum Aussortieren ausgelöst wurde. Die Ursache dafür ist nicht bekannt. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, wurde die Probe händisch nachsortiert.

Konstruktive Besonderheit des NIR-Sortierers:

Bedingt durch die Neigung der Sortierfläche (siehe Abbildung 18, linkes Bild) kam es vor, dass flächige oder leichte Probenteile beim nach unten Gleiten durch den Sensorbereich den Kontakt zur Sortierfläche verloren und durch die Luft schwebten. Das hatte zur Folge, dass Probenmaterial nicht oder nicht korrekt erkannt und aussortiert wurde. Weiters kam es vor, dass Material dadurch fälschlicherweise in den hinteren Behälter gelangte. Es war also auch mit der maschinellen Sortierung nicht möglich, völlig fehlerfrei zu sortieren. Mit einer händischen Nachsortierung der Sortierreste wurde daher versucht, die Fehlerquote zu minimieren.

Hinweis zu den Ergebnissen und verwendeten Daten:

Aufgrund der langen Dauer der maschinellen NIR-Sortierung der Proben E2, E3, E6, E7 und E10 konnten die Versuche nicht rechtzeitig vor der Fertigstellung dieser Arbeit abgeschlossen werden. Um dennoch valide Daten für die Versuche zu erhalten, wurden diese von zuvor durchgeführten Arbeiten herangezogen. Als Quelle diente hier das Paper von Möllnitz et al. (2020). Hier wurde, ebenso wie in dieser Arbeit, gemischter Gewerbeabfall gesiebt und nach unterschiedlichen Fraktionen, darunter Kunststoff, sortiert. Die für die weiteren Versuche im Zuge dieser Arbeit verwendeten Daten sind in Abbildung 66 dargestellt. Die Zusammensetzung der Proben erstreckt sich jeweils über alle Korngrößenbereiche > 200 bis 40 – 20 mm.

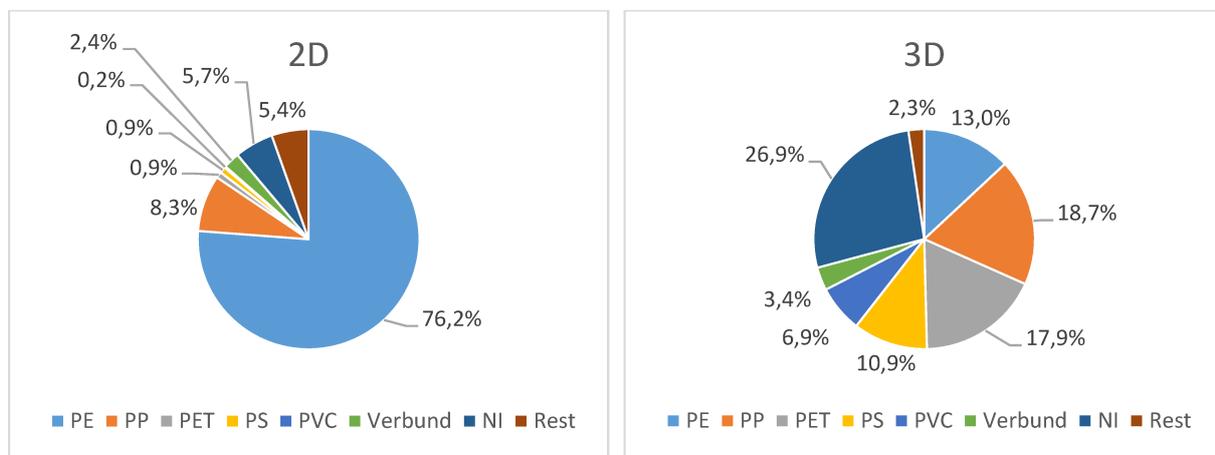


Abbildung 66: Zusammensetzung der 2D- und 3D-Fraktion. Quelle: Möllnitz et al. (2020), modifiziert von Martin Berger

Die, bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit, verfügbaren eigenen Daten aus der NIR-Sortierung werden für einen Vergleich herangezogen. Diese sind in Abbildung 67 dargestellt.

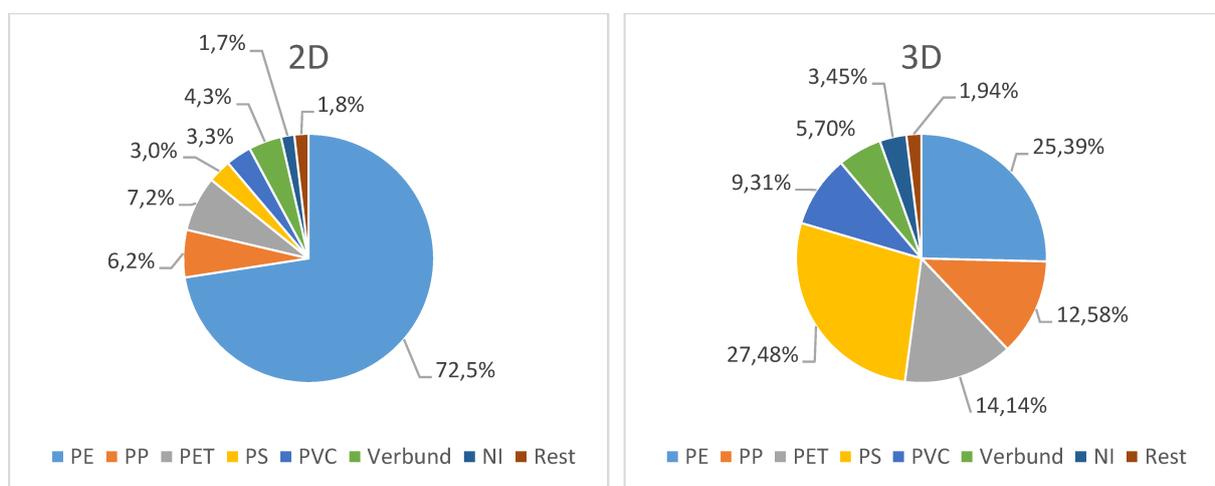


Abbildung 67: Teilergebnis der eigenen Sortierung der 2D-Fraktion und 3D-Fraktion

Es zeigt sich, dass die Zusammensetzung der beiden 2D-Fractionen größtenteils übereinstimmen. In beiden Fällen setzt sich die Probe hauptsächlich aus PE zusammen. Anders beim Vergleich der 3D-Fractionen. Hier sind beim Vergleich der Fractionen PE, PS und NI deutliche Unterschiede erkennbar.

3.5 Einfluss von unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten

3.5.1 Ergebnis

Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Gesamtprobe der allgemeinen Sortierung sind in Tabelle 11 und Abbildung 68 ersichtlich.

Tabelle 11: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf ausgewählte Fractionen

Fraktion	0% Recycling		25% Recycling		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]
PE	112,5	13,9%	84,4	11,3%	56,3	8,2%	28,1	4,5%	0	0%
PP	47,9	5,9%	35,9	4,8%	23,9	3,5%	12,0	1,9%	0	0%
PET	52,1	6,4%	39,0	5,2%	26,0	3,8%	13,0	2,1%	0	0%
PS	23,5	2,9%	17,6	2,4%	11,7	1,7%	5,9	0,9%	0	0%
Rest	571,6	70,8%	571,6	76,4%	571,6	82,9%	571,6	90,6%	571,6	100,0%
Summe	807,6	100,0%	748,6	100,0%	689,6	100,0%	630,6	100,0%	571,6	100,0%

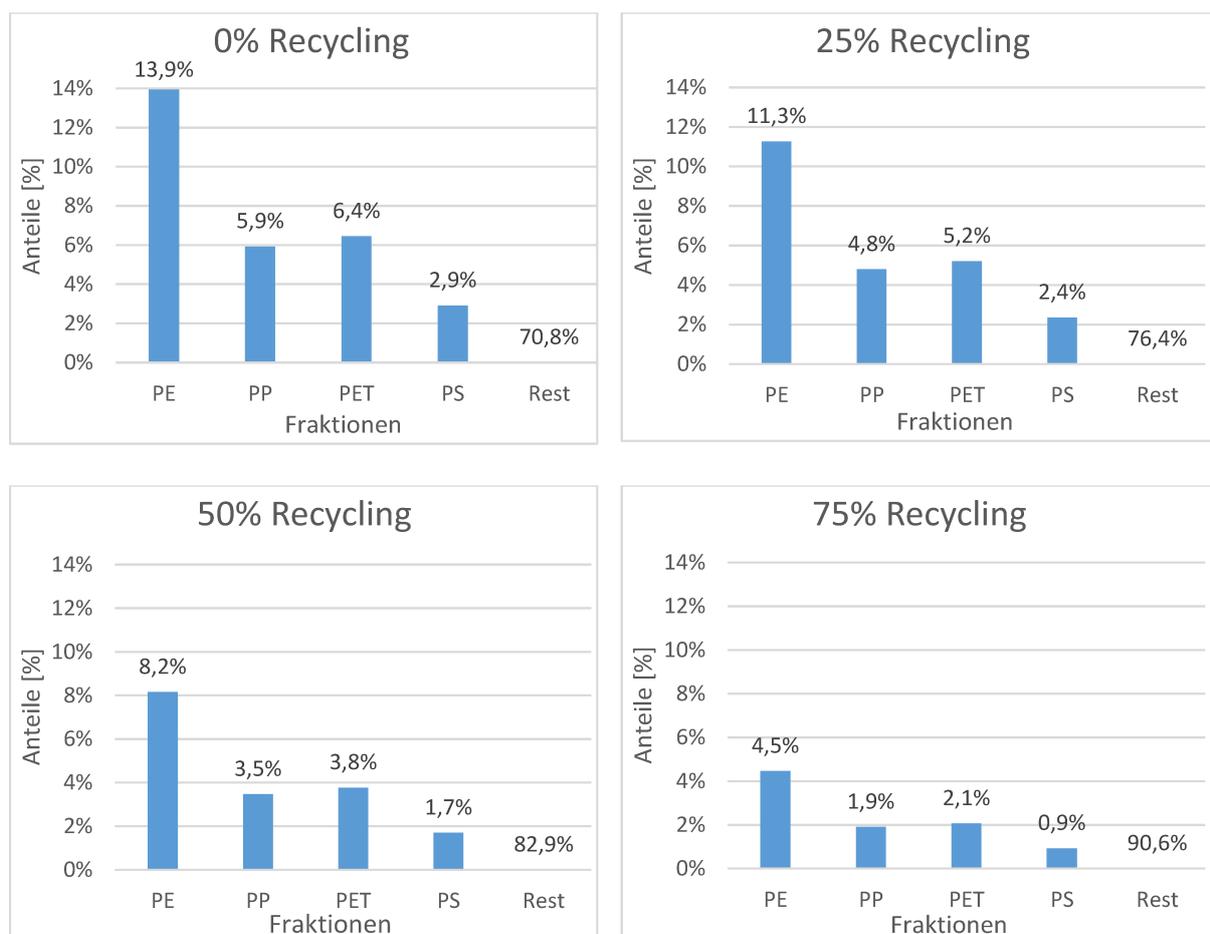


Abbildung 68: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Gesamtprobe

Hier erfolgt noch die Darstellung des Einflusses von Recyclingraten auf die einzelnen Proben E1, E4 und E5. Diese sind in Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 sowie in Abbildung 69, Abbildung 70 und Abbildung 71 ersichtlich.

Tabelle 12: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E1

E1 Fraktion	0% Recycling		25% Recycling		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]
PE	8,3	5,5%	6,2	4,3%	4,1	2,9%	2,1	1,5%	0	0%
PP	3,7	2,5%	2,8	1,9%	1,9	1,3%	0,9	0,7%	0	0%
PET	3,5	2,3%	2,6	1,8%	1,7	1,2%	0,9	0,6%	0	0%
PS	1,8	1,2%	1,4	1,0%	0,9	0,7%	0,5	0,3%	0	0%
Rest	132,3	88,4%	132,3	91,1%	132,3	93,9%	132,3	96,8%	132,3	100,0%
Summe	149,5	100,0%	145,2	100,0%	140,9	100,0%	136,6	100,0%	132,3	100,0%

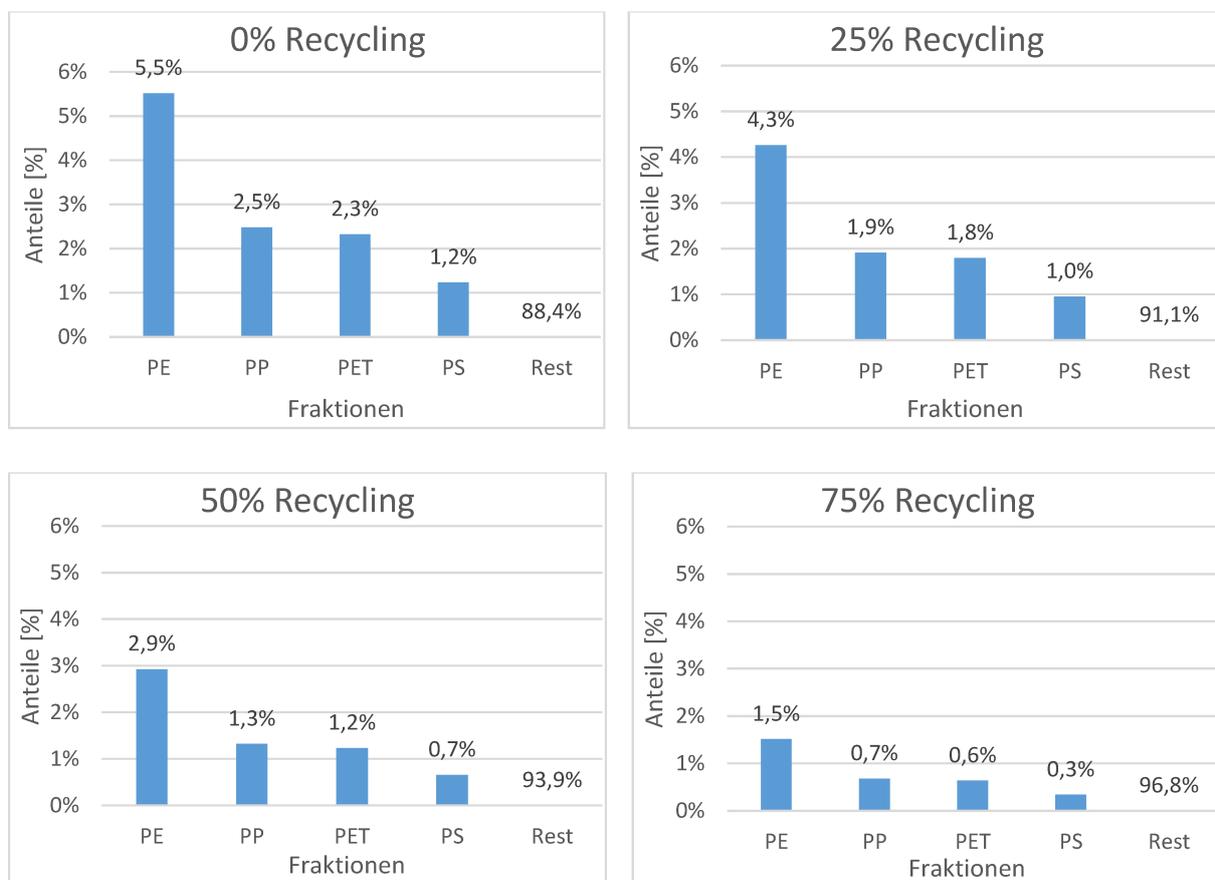


Abbildung 69: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E1

Tabelle 13: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E4

E4 Fraktion	0% Recycling		25% Recycling		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]
PE	5,6	8,1%	4,2	6,4%	2,8	4,5%	1,4	2,3%	0	0%
PP	2,6	3,7%	1,9	2,9%	1,3	2,0%	0,6	1,1%	0	0%
PET	2,6	3,8%	2,0	3,0%	1,3	2,1%	0,7	1,1%	0	0%
PS	1,3	1,9%	1,0	1,5%	0,6	1,0%	0,3	0,5%	0	0%
Rest	57,1	82,5%	57,1	86,3%	57,1	90,4%	57,1	95,0%	57,1	100,0%
Summe	69,2	100,0%	66,2	100,0%	63,2	100,0%	60,2	100,0%	57,1	100,0%

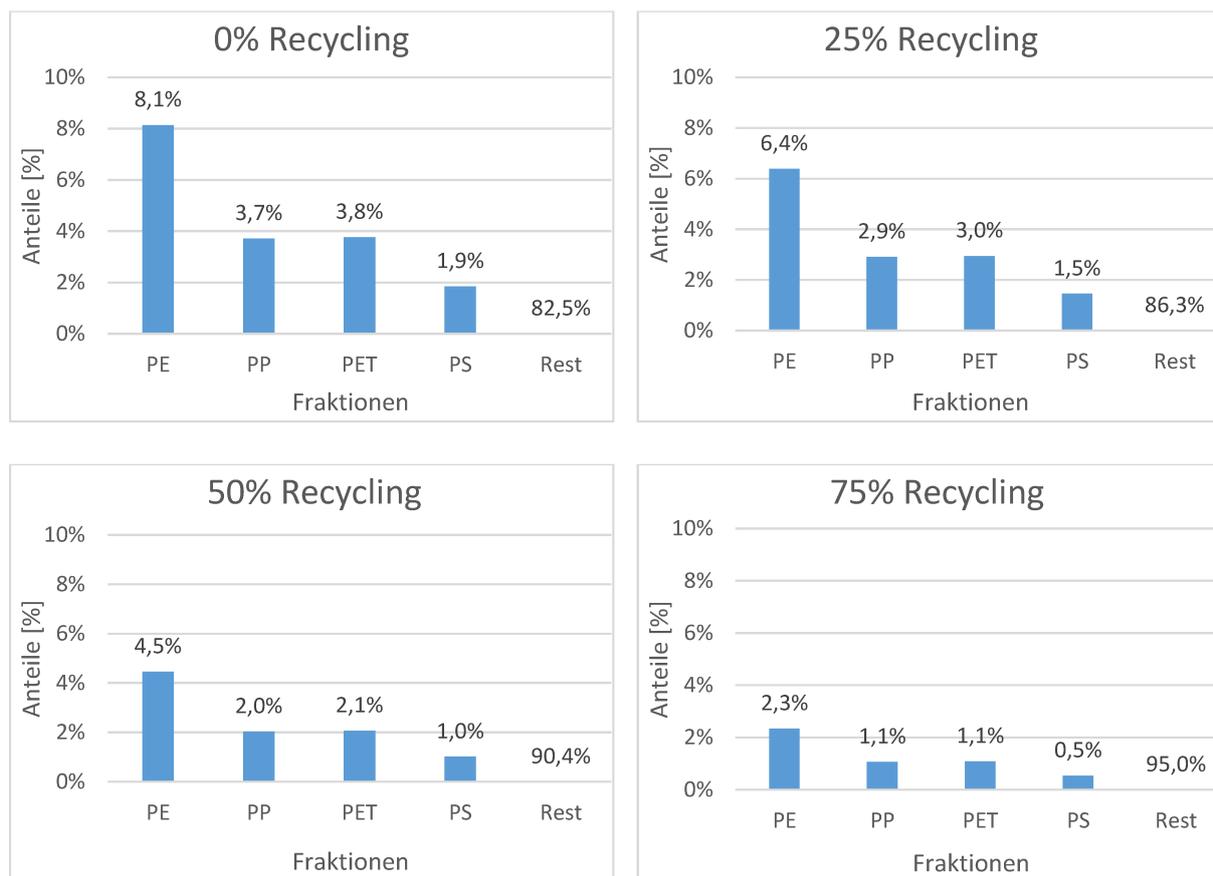


Abbildung 70: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E4

Tabelle 14: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E5

E5 Fraktion	0% Recycling		25% Recycling		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]	Masse [kg]	Anteile [%]
PE	8,2	5,8%	6,2	4,5%	4,1	3,1%	2,1	1,6%	0	0%
PP	3,7	2,6%	2,8	2,0%	1,9	1,4%	0,9	0,7%	0	0%
PET	4,6	3,2%	3,5	2,5%	2,3	1,7%	1,2	0,9%	0	0%
PS	1,9	1,3%	1,4	1,0%	0,9	0,7%	0,5	0,4%	0	0%
Rest	124,1	87,1%	124,1	90,0%	124,1	93,1%	124,1	96,4%	124,1	100,0%
Summe	142,5	100,0%	137,9	100,0%	133,3	100,0%	128,7	100,0%	124,1	100,0%

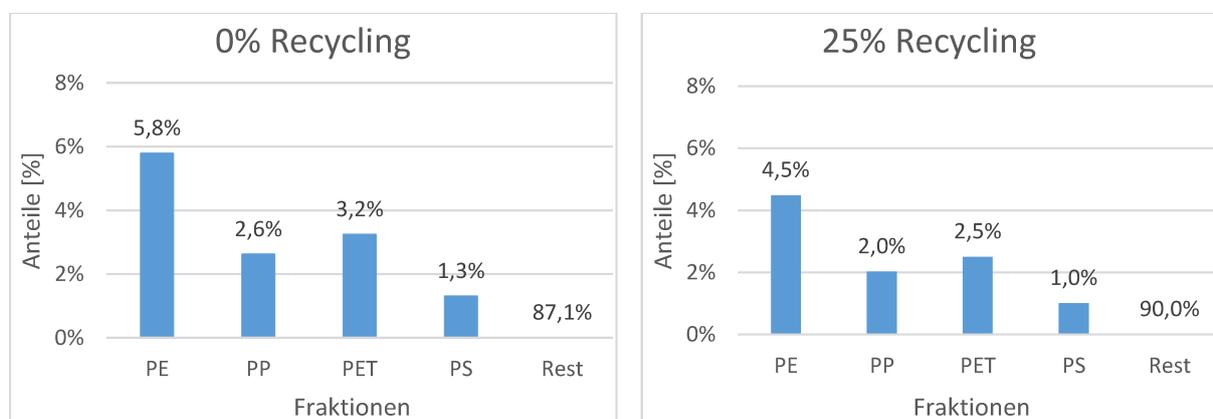




Abbildung 71: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E5

3.5.2 Diskussion

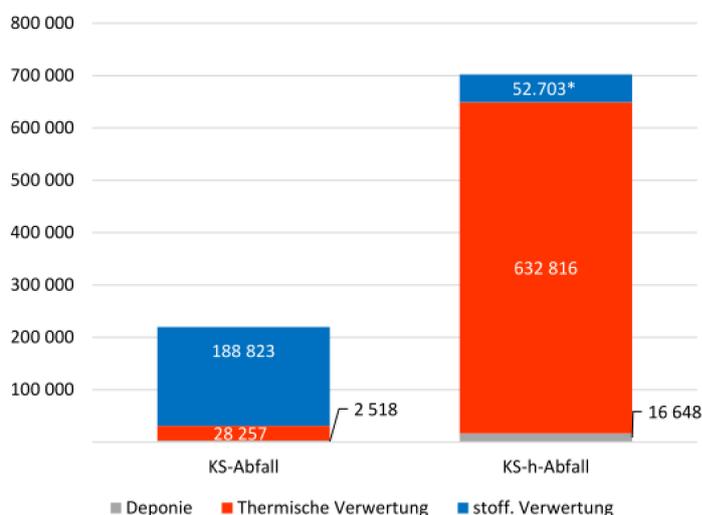
Wie bei der Methodenbeschreibung bereits erwähnt, wird die Annahme getroffen, dass der gemischte Gewerbeabfall vor der erfolgten Probennahme keinerlei technische Abfallbehandlung erfahren hat. Für diese herangezogenen Fraktionen ergibt sich daher eine Recyclingrate von 0 %. Zu Beginn erfolgt die Betrachtung der gesamten Probenzusammensetzung. Im Anschluss folgen die Einzelfraktionen E1, E4 und E5. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass gesteigerte Recyclingraten sich auf die Fraktionen PE, PP, PET und PS auswirken, da diese Kunststofffraktionen leicht zu recyceln sind, vor allem die drei erstgenannten. Beim Worst-Case Szenario wurden sämtliche Kunststoff-Fraktionen PE, PP, PET und PS entfernt. Die EBS-Fraktion besteht also nur noch aus der Rest-Fraktion. Auf eine grafische Darstellung wird deshalb verzichtet. In der Praxis ist dieses Szenario eher unwahrscheinlich, da die Erkennung und Ausschleusung von Materialien nie zu 100 % funktioniert. Es soll lediglich als Extrembeispiel dienen. Erwähnt sei jedoch noch, dass die betrachteten PE, PP, PET und PS-Fraktionen bereits mittels NIR entsprechend sortiert und somit erkannt wurden, diese Fraktionen enthalten demnach keine schwarzen oder nicht identifizierbaren Partikel mehr.

Entfernt man Kunststoff, dann nimmt die Menge in der Probe sowie die Gesamtmasse der Probe ab. Indirekt hat das auch Auswirkungen auf die Rest-Fraktion. Dessen ursprüngliche Menge bleibt zwar gleich, jedoch ändert sich ihr prozentueller Anteil an der Probe. In allen Szenarien, ob Gesamt- oder Einzelprobe, wird die Metall- und Inert-Fraktion entfernt. Diese Annahme ist realistisch, da in einer Anlage zur EBS-Produktion in der Regel Fe-, NE- und Inert-Abscheider vorhanden sind (siehe Abbildung 2).

Tatsächlicher Einfluss von Recyclingraten auf die EBS-Produktion:

Wie groß der tatsächliche Einfluss von Recyclingraten auf die EBS-Produktion ist, kann nicht exakt beurteilt werden. Es gibt unterschiedliche Faktoren, welche eine positive oder negative Auswirkung auf die Menge an zur Verfügung stehendem Kunststoff zur EBS-Produktion haben können. Eine Annahme ist, dass zum Erreichen der Recyclingziele zuerst jene

Abfallfraktionen herangezogen werden, die relativ einfach stofflich aufbereitet werden können. In Abbildung 72 ist die Aufteilung der Kunststoffabfälle dargestellt. Diese sind in sortenreine Kunststoffabfälle und kunststoffhaltige Abfälle unterteilt. Laut Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022) werden die sortenreinen Kunststoffabfälle zu 86 % stofflich, zu 13 % thermisch verwertet und zu 1 % deponiert. Bei den kunststoffhaltigen Abfällen werden 90 % thermisch, 8 % stofflich verwertet und 2 % deponiert. Um die zukünftigen Recyclingziele zu erreichen, könnten zuerst jene Abfälle recycelt werden, welche sortenrein und sauber sind, sowie hohe Korngrößen aufweisen. Also jene 13 % bei sortenreinen Kunststoffabfällen und gut recycelbare Bestandteile der 90 % der kunststoffhaltigen Abfälle, welche zuvor noch thermisch verwertet wurden. Da für die EBS-Produktion vorwiegend gemischte Abfälle mit kleineren Korngrößen und höherem Verunreinigungsgrad verwendet werden, ist es durchaus möglich, dass gesteigerte Recyclingraten vorerst keinen Einfluss auf die Menge an zur Verfügung stehendem EBS haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch einen gesteigerten Konsum und höheren Lebensstandard die zukünftig produzierten Abfallmengen ansteigen werden. Der Verlust von Abfallmenge für die EBS-Produktion durch erhöhte Recyclingraten könnte dadurch teilweise ausgeglichen werden. Diese Annahme würde sich also positiv auf die Verfügbarkeit von Kunststoff für die EBS-Produktion auswirken. Auf der anderen Seite könnte ein zukünftiges Wachstum der Wirtschaft und eine damit einhergehende erhöhte Produktion von Zement, sowie von erhöhten Einsatzraten von EBS, sich negativ auf die Verfügbarkeit von EBS auswirken. Kennzahlen aus dem Bericht der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (2019) legen eine solche Schlussfolgerung zumindest nahe.



* beinhaltet sowohl stoffliche Verwertung als auch Verwertung als Reduktionsmittel in der Eisen- und Stahlindustrie

Abbildung 72: Behandlung von sortenreinen Kunststoffabfällen und kunststoffhaltigen Abfällen in Österreich im Referenzjahr 2019 in [t], Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022)

3.6 Berechnung der Heizwerte der Gesamtproben

3.6.1 Ergebnis

In der Tabelle 15 sind die Heizwerte der Proben E1, E4 und E5 über alle Korngrößenbereiche aufgelistet. Mit ihnen erfolgte die Berechnung der Heizwerte der Proben. Die Ergebnisse der Berechnung der Heizwerte der Proben E1, E4 und E5 sind in den Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 ersichtlich. In der Tabelle 19 ist das Ergebnis der Mittelwerte und der Standardabweichung der drei Proben dargestellt.

Tabelle 15: Heizwerte der Proben E1, E4 und E5 über alle Korngrößenbereiche

Hu OS [kJ/kg]	E1	E4	E5
> 200	23100	22200	23800
200-100	22200	20000	16100
100-80	20400	24400	26900
80-60	18500	22500	17900
60-40	20000	18200	16600
40-20	13500	16800	15700
20-10	9690	14800	10700
10-5	8660	9510	4940
< 5	3810	4270	2550

Tabelle 16: Ergebnis der Heizwertberechnung von E1

E1	>200	200-100	100-80	80-60	60-40	40-20	20-10	10-5	<5	Summe
KS 2D	1,0	3,0	0,7	1,2	0,9	1,4				
KS 3D	0,9	4,1	2,0	2,5	2,7	4,1				
Schwarz	0,0	1,6	1,1	2,6	3,0	3,7				
PET-Getränke	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0				
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Tetra	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0				
Gummi	3,6	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1				
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0				
Verbund	0,8	3,4	1,3	1,2	1,4	1,0				
EAG	0,0	0,6	0,4	0,3	0,1	0,2				
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2				
Holz	0,0	0,8	0,7	2,4	1,7	1,5				
PPK	0,0	4,6	2,1	3,5	2,4	1,8				
Textil	1,3	4,7	1,3	1,4	0,6	0,5				
Rest	0,1	0,3	0,2	0,5	1,2	3,1				
Organik	0,0	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0				
Masse [kg]	7,8	24,1	10,0	16,1	14,3	17,6	24,8	25,5	9,4	149,5
Energie [MJ]	179,0	534,6	204,6	297,9	286,8	237,3	240,2	220,9	35,7	2237,1
Heizwert [MJ/kg OS]	23,1	22,2	20,4	18,5	20,0	13,5	9,7	8,7	3,8	15,0

Tabelle 17: Ergebnis der Heizwertberechnung von E4

E4	>200	200-100	100-80	80-60	60-40	40-20	20-10	10-5	<5	Summe
KS 2D	1,1	1,9	0,8	0,7	0,7	0,3				
KS 3D	1,5	3,3	1,6	1,6	1,6	1,7				
Schwarz	0,0	2,4	1,1	1,0	1,3	1,2				
PET-Getränke	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0				
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0				
Tetra	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0				
Gummi	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0				
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Verbund	0,0	2,4	1,6	1,2	0,9	0,4				
EAG	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0				
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Holz	0,0	0,6	0,9	1,2	1,7	1,2				
PPK	0,0	1,4	0,6	1,3	1,5	1,3				
Textil	0,6	1,6	0,4	0,3	0,5	0,2				
Rest	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2				
Organik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Masse [kg]	3,2	13,7	7,2	8,0	8,6	6,6	8,1	3,9	10,0	69,2
Energie [MJ]	71,6	274,9	175,9	179,2	155,6	110,3	119,7	37,4	42,5	1167,1
Heizwert [MJ/kg OS]	22,2	20,0	24,4	22,5	18,2	16,8	14,8	9,5	4,3	16,9

Tabelle 18: Ergebnis der Heizwertberechnung von E5

E5	>200	200-100	100-80	80-60	60-40	40-20	20-10	10-5	<5	Summe
KS 2D	1,0	4,7	0,9	0,7	0,5	0,3				
KS 3D	1,7	5,8	2,5	2,4	2,2	1,8				
Schwarz	0,1	3,2	0,9	1,1	0,8	0,7				
PET-Getränke	0,0	0,6	0,4	0,3	0,1	0,0				
PET-Essig	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0				
Tetra	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0				
Gummi	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0				
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Verbund	2,1	7,3	1,3	1,2	1,2	0,9				
EAG	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1				
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
Holz	0,0	2,0	0,6	1,2	0,8	0,8				
PPK	0,0	3,5	0,9	1,0	1,1	0,8				
Textil	0,0	0,4	0,1	1,4	0,8	1,7				
Rest	0,0	0,5	0,1	0,5	0,3	0,7				
Organik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1				
Masse [kg]	5,1	28,2	13,0	19,8	15,8	16,1	16,9	9,8	15,1	139,7
Energie [MJ]	120,4	453,4	348,8	354,8	262,5	252,1	181,2	48,3	38,6	2060,0
Heizwert [MJ/kg OS]	23,8	16,1	26,9	17,9	16,6	15,7	10,7	4,9	2,6	14,7

Tabelle 19: Mittelwert und Standardabweichung der Heizwerte der Proben E1, E4 und E5

Proben	Heizwerte [MJ/kg OS]
E1	15,0
E4	16,9
E5	14,7
Mittelwert	15,5
Standardabweichung	1,2

3.6.2 Diskussion

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit waren lediglich die Heizwerte der Proben E1, E4 und E5 vollständig im Labor bestimmt worden. Von den restlichen Proben lagen nur teilweise bzw. keine Ergebnisse vor. Es wurde daher auf die drei vorhandenen Proben

zurückgegriffen. Um die Ergebnisse der Berechnung zu ergänzen, wurde noch der Mittelwert und die Standardabweichung der drei Proben berechnet. Wäre die Standardabweichung der Heizwerte geringer, könnte man als Alternative mit dem Mittelwert der Proben und der Gesamtmasse aller Proben E1 bis E10 den Einfluss von Recyclingraten auf den Heizwert berechnen. Da dies nicht der Fall ist, erfolgt die Berechnung in Kapitel 2.8.2 mithilfe der bekannten Einzelproben. Weitere Ergebnisse der Laboruntersuchung sind in Anhang IX zu finden.

Die Heizwerte der Proben zeigen, dass diese – ohne weitere Aufbereitungsschritte zur Abreicherung der heizwertarmen Feinfraktionen bzw. Anreicherung der heizwertreichen Fraktionen – als Gesamtes eher einem Kalzinator-Brennstoff entsprechen würden.

3.7 Heizwert bei unterschiedlichen Kunststoff-Recyclingraten

3.7.1 Ergebnis

Hier werden nun die Auswirkungen der unterschiedlichen Recyclingraten auf den Heizwert der Proben E1, E4 und E5 dargestellt. Diese sind in Tabelle 20, Tabelle 21 und Tabelle 22, sowie in Abbildung 73, Abbildung 74 und Abbildung 75 ersichtlich.

Tabelle 20: Änderung der Heizwerte der Probe E1 über die Recyclingraten

E1		0% Recycling		25% Recycling			
Fraktion	Heizwert [MJ/kg OS]	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]		
PE	41,1	8,3	339,2	6,2	254,4		
PP	41,9	3,7	155,6	2,8	116,7		
PET	21,6	3,5	75,1	2,6	56,3		
PS	37,0	1,8	68,4	1,4	51,3		
Rest	12,1	132,3	1598,8	132,3	1598,8		
Summe [kg]		149,5	2237,1	145,2	2077,5		
Heizwert [MJ/kg OS]		15,0		14,3			
		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
Fraktion	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]	
PE	4,1	169,6	2,1	84,8	0	0	
PP	1,9	77,8	0,9	38,9	0	0	
PET	1,7	37,6	0,9	18,8	0	0	
PS	0,9	34,2	0,5	17,1	0	0	
Rest	132,3	1598,8	132,3	1598,8	132,3	1598,8	
Summe [kg]	140,9	1917,9	136,6	1758,4	132,3	1598,8	
Heizwert [MJ/kg OS]	13,6		12,9		12,1		

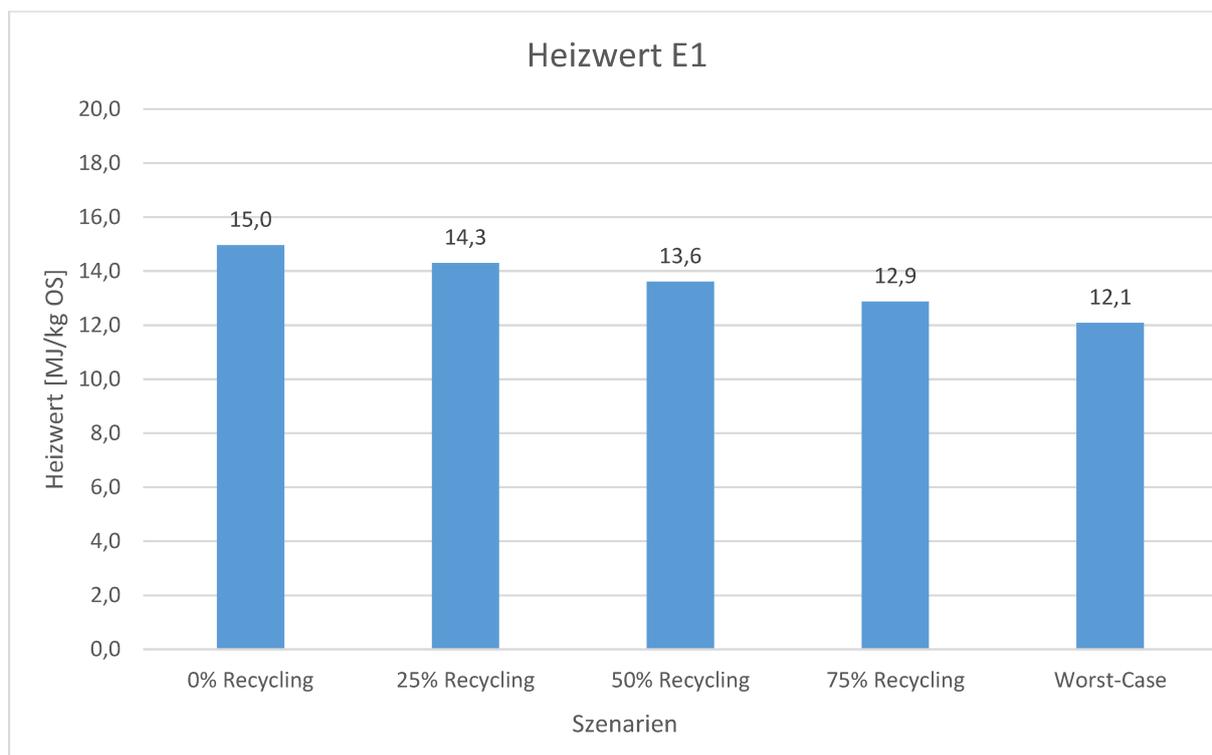


Abbildung 73: Grafische Darstellung der Änderung der Heizwerte von E1 über die Recyclingraten

Tabelle 21: Änderung der Heizwerte der Probe E4 über die Recyclingraten

E4		0% Recycling		25% Recycling			
Fraktion	Heizwert [MJ/kg OS]	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]		
PE	41,1	5,6	231,6	4,2	173,7		
PP	41,9	2,6	107,7	1,9	80,8		
PET	21,6	2,6	56,3	2,0	42,2		
PS	37,0	1,3	47,5	1,0	35,6		
Rest	12,7	57,1	723,9	57,1	723,9		
Summe [kg]		69,2	1167,1	66,2	1056,3		
Heizwert [MJ/kg OS]		16,9		16,0			
		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
Fraktion	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]	
PE	2,8	115,8	1,4	57,9	0	0	
PP	1,3	53,9	0,6	26,9	0	0	
PET	1,3	28,2	0,7	14,1	0	0	
PS	0,6	23,7	0,3	11,9	0	0	
Rest	57,1	723,9	57,1	723,9	57,1	723,9	
Summe [kg]	63,2	945,5	60,2	834,7	57,1	723,9	
Heizwert [MJ/kg OS]	15,0		13,9		12,7		

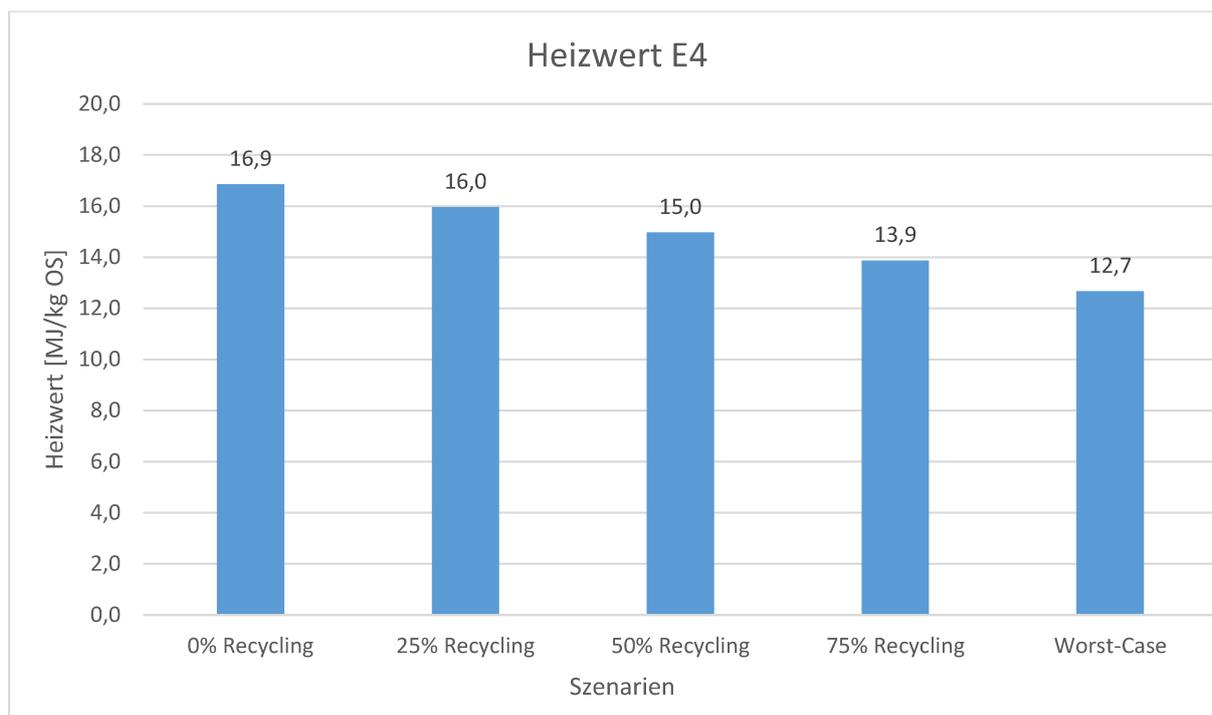


Abbildung 74: Grafische Darstellung der Änderung der Heizwerte von E4 über die Recyclingraten

Tabelle 22: Änderung der Heizwerte der Probe E5 über die Recyclingraten

E5		0% Recycling		25% Recycling			
Fraktion	Heizwert [MJ/kg OS]	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]		
PE	41,1	8,2	338,8	6,2	254,1		
PP	41,9	3,7	156,2	2,8	117,1		
PET	21,6	4,6	99,6	3,5	74,7		
PS	37,0	1,9	68,7	1,4	51,5		
Rest	11,5	121,3	1396,7	121,3	1396,7		
Summe [kg]		139,7	2060,0	135,1	1894,1		
Heizwert [MJ/kg OS]		14,7		14,0			
		50% Recycling		75% Recycling		Worst-Case	
Fraktion	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]	Masse [kg]	Energie [MJ]	
PE	4,1	169,4	2,1	84,7	0	0	
PP	1,9	78,1	0,9	39,0	0	0	
PET	2,3	49,8	1,2	24,9	0	0	
PS	0,9	34,3	0,5	17,2	0	0	
Rest	121,3	1396,7	121,3	1396,7	121,3	1396,7	
Summe [kg]	130,5	1728,3	125,9	1562,5	121,3	1396,7	
Heizwert [MJ/kg OS]	13,2		12,4		11,5		

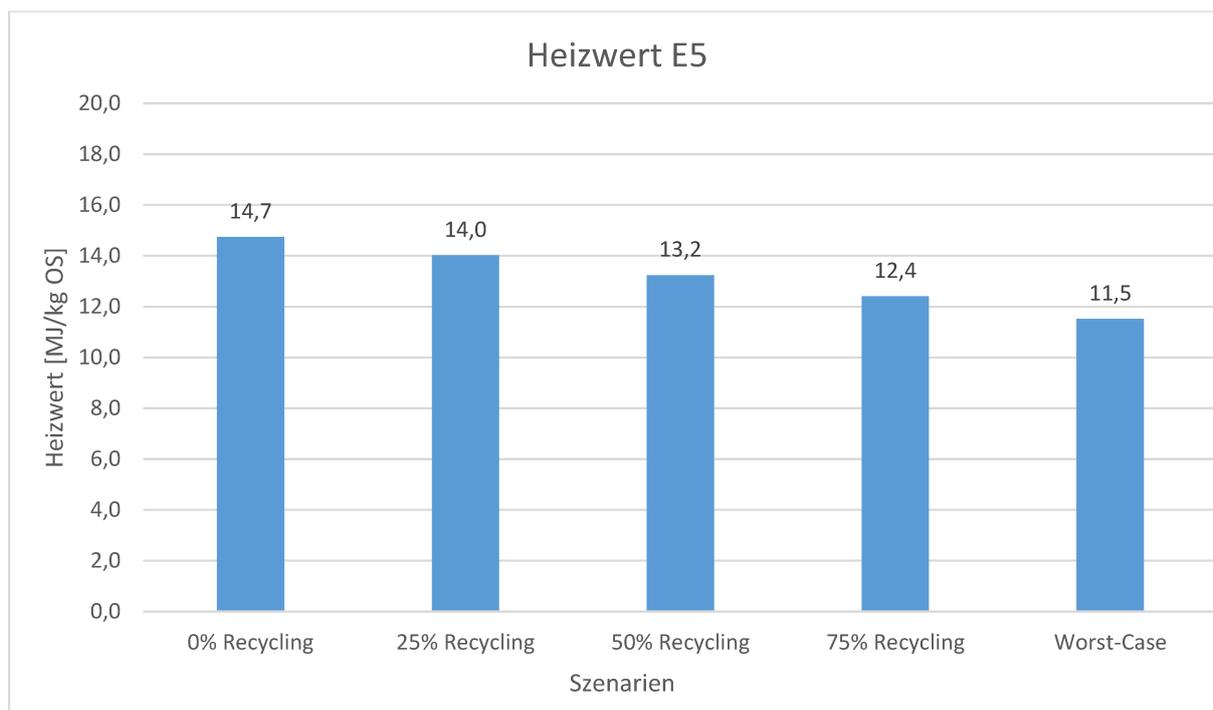


Abbildung 75: Grafische Darstellung der Änderung der Heizwerte von E5 über die Recyclingraten

3.7.2 Diskussion

Wie zu erwarten, nimmt der Heizwert der Proben E1, E4 und E5 mit einer erhöhten Recyclingrate und damit einhergehenden Entfernung von heizwertreichem Material ab. Der Anteil der Kunststofffraktionen an der Ausgangsprobe ist bei E1 11,6 %, bei E4 17,5 % und bei E5 13,2 %. Diese Anteile sind nicht sehr hoch, jedoch haben insbesondere die Kunststofffraktionen hohe Heizwert und sind für die EBS-Produktion von großer Bedeutung. Mit steigenden Recyclingraten nehmen die Anteile an der Probe dann noch weiter ab. Von allen drei Proben hat E4 prozentual den höchsten Anteil an Kunststoffen an ihrer Probenmasse. Das spiegelt sich auch in den Heizwerten wider, welche für E4 über alle Szenarien am höchsten sind.

4 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden aus den zuvor ermittelten Daten entsprechende Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen abgegeben. Zum einen für den möglichen Einsatzbereich des untersuchten Abfalls als EBS, zum anderen, wie sich die Veränderungen der untersuchten Parameter über einen bestimmten Zeithorizont auswirken könnten.

4.1 Eignung der Abfälle als Ersatzbrennstoffe

Je nach betrachtetem Szenario eignet sich die Abfallzusammensetzung für einen bestimmten Einsatzort als EBS im Zementwerk. Abhängig von definierten Parametern, beim EBS sind das hauptsächlich Heizwert und Korngröße, kann er in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden. Zusätzlich wird noch die Kornform mitbetrachtet. Zusammengefasst sind diese Kriterien in Tabelle 23 ersichtlich. In Tabelle 25 sind die unterschiedlichen Szenarien und der sich ergebende Einsatzort dargestellt, weiters erfolgt noch ein Vergleich mit einer realen EBS-Probe.

Tabelle 23: Kriterien für den Einsatzort von EBS, Quelle: Lorber et al. (2010), modifiziert von Martin Berger

Kriterium	Ersatzbrennstoffqualität		
	Hotdisc	Kalzinator	Primärfeuerung
Heizwert	10-15 [MJ/kg]	11-18 [MJ/kg]	22-25 [MJ/kg]
Korngröße	80-100 < [mm]	< 50-80 [mm]	< 10-30 [mm]
Kornform	3D	3D	2D

Die Heizwerte, sowie die möglichen Einsatzbereiche der untersuchten Proben E1, E4 und E5 sind in Tabelle 24 ersichtlich.

Tabelle 24: Einsatzbereich der Proben E1, E4 und E5 bei unterschiedlichen Recyclingraten

	0% Recycling	25% Recycling	50% Recycling	75% Recycling	Worst-Case
Heizwert E1 [MJ/kg OS]	15,0	14,3	13,6	12,9	12,1
Einsatzbereich	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc
Heizwert E4 [MJ/kg OS]	16,9	16,0	15,0	13,9	12,7
Einsatzbereich	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc
Heizwert E5 [MJ/kg OS]	14,7	14,0	13,2	12,4	11,5
Einsatzbereich	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc

Je nach Korngröße oder Form der Partikel in der Abfallprobe ergibt sich ein Einsatzort, der entweder im Bereich des Kalzinators oder der Hotdisc liegt. Keine der berechneten Heizwerte der drei Proben ermöglichen einen Einsatz im Bereich der Primärfeuerung. Die Heizwerte von E4 liegen beim 0 und 25 % Szenario bei 16,9 und 16,0 MJ/kg. Aufgrund dieser Werte liegt der Einsatzbereich beim Kalzinator, da sie für einen Einsatz in der Hotdisc zu hoch sind. Würden die Abfallproben, welche ja noch unbehandelt sind, in einer EBS produzierenden Anlage entsprechend aufbereitet, so könnte sich je nach Szenario durchaus ein Einsatz im Bereich der Primärfeuerung ergeben. Die dafür geeigneten heizwertreichen Kunststofffraktionen sind bekanntlich in der Probe vorhanden.

Vergleich der Heizwerte der Abfallprobe mit dem Heizwert einer EBS-Probe:

Als Quelle des Heizwertes einer realen EBS-Probe dient das Paper Sarc et al. (2019). In diesem Paper wurden unterschiedliche Proben analysiert. Als Vergleich wird eine Probenanalyse von aufbereitetem EBS mit premium Qualität aus dem Jahr 2018 herangezogen. Analysiert wurden acht einzelne Proben, welche in der Tabelle 25 als Mittelwert und Median dargestellt sind. Dabei handelt es sich um den unteren Heizwert bezogen auf die Originalsubstanz.

Tabelle 25: Überblick über die Szenarien, ihren jeweiligen Heizwert und Einsatzort sowie einem Vergleich mit realen Daten aus Sarc et al. (2019)

	0% Recycling	25% Recycling	50% Recycling	75% Recycling	Worst-Case
Heizwert E1 [MJ/kg OS]	15,0	14,3	13,6	12,9	12,1
Einsatzbereich	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc
Heizwert E4 [MJ/kg OS]	16,9	16,0	15,0	13,9	12,7
Einsatzbereich	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc
Heizwert E5 [MJ/kg OS]	14,7	14,0	13,2	12,4	11,5
Einsatzbereich	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc	Kalzinator/Hotdisc
Reale EBS-Probe [MJ/kg OS]					
	Median		Mittelwert		
	17,7		18,2		

4.2 Kurz- und Mittelfristige Betrachtung

Kurzfristige Betrachtung:

Auf kurze Sicht wird es wahrscheinlich zu keinen großen Änderungen kommen, was die Verfügbarkeit und Zusammensetzung von Abfall zur Herstellung von EBS betrifft. Betrachtet man die relevanten Daten des Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022) so zeigt sich, dass noch ausreichend Abfallmenge zur Verfügung steht, um eine Herstellung von qualitativ hochwertigem EBS zu gewährleisten.

Mittelfristige Betrachtung:

Bis zu den Jahren 2025, 2030 und 2035 ist die Recyclingrate auf 55, 60 und 65 % zu erhöhen. Das hat zur Folge, dass sowohl die Menge an Abfall, welcher für die Produktion von EBS zur Verfügung steht, abnimmt, als auch eine Veränderung der Zusammensetzung hin zu Bestandteilen mit geringerem Heizwert zu erwarten ist. Weiters führt das dazu, dass sich der Einsatzort von EBS bei der Klinkerproduktion vom Primärbereich hin zum Sekundärbereich verschieben könnte. Um dieser Verschiebung entgegenzuwirken könnte man versuchen, langfristige Lieferverträge abzuschließen, oder zusätzliche Bezugsquellen von Abfall für die EBS-Produktion zu finden.

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss von gesteigerten Recyclingraten auf die Qualität von Ersatzbrennstoffen zu untersuchen. Betrachtet wurden hauptsächlich die Abfallzusammensetzung und der Heizwert der Proben.

Im Zuge der Masterarbeit wurden unterschiedliche Versuche und Analysen durchgeführt. Dazu zählen eine Probenahme, eine Siebung, die allgemeine Sortierung des gesiebten Abfalls und eine maschinelle Sortierung mit NIR-Technik der Kunststoff 2D- und 3D-Fraktion. Die Analyse der Versuchsergebnisse erfolgte mit Hilfe unterschiedlicher Recyclingszenarien.

Der erste Versuchsschritt war eine Probenahme von gemischtem Gewerbeabfall auf dem Gelände der Firma Mayer Recycling in St. Michael. Es wurden insgesamt 10 Proben (E1 bis E10) mit einem Gesamtgewicht von 1545,5 kg gewonnen. Im Anschluss an die Probenahme erfolgte eine Siebung des Abfalls. Die verwendeten Siebschnitte 200, 100, 80, 60, 40, 20, 10 und 5 mm führten zu den KorngröÙeneinteilungen > 200, 200 – 100, 100 – 80, 80 – 60, 60 – 40, 40 – 20, 20 – 10, 10 – 5 und < 5 mm. Die Probenmasse nach dem Siebvorgang betrug 1454,1 kg. Der nächste Schritt war eine allgemeine Sortierung. Diese erfolgte per Hand auf einem Sortiertisch. Die Probe wurde in 18 unterschiedliche Fraktionen sortiert: Tetra, Inert, Gummi, EAG, PPK, Holz, KS 3D, KS 2D, Schwarz, Textil, Verpackung mit Inhalt, Metall, PET (Getränke), Verbund, PET (Essig), Organik, Batterien und Rest. Diese Arbeitsschritte erfolgten für die Korngrößenbereiche > 200 mm bis 40 – 20 mm. Die Größenbereiche 20 – 10, 10 – 5 und < 5 mm kamen, ohne eine Sortierung, direkt ins Labor des AVAW zur Analyse. In Summe wurden 950,2 kg an Probenmaterial sortiert. Nach dieser allgemeinen Sortierung folgte noch eine maschinell unterstützte Sortierung mit NIR-Technologie. Diese wurde für die KS 2D- und KS 3D-Fraktionen durchgeführt. Sortiert wurden die Korngrößenbereiche > 200 mm bis 80 – 60 mm. Auf eine Analyse der Klassen 60 – 40 mm und 40 – 20 mm wurde verzichtet, da es sehr aufwändig und teilweise nicht möglich war. Die maschinelle Sortierung lieferte die Fraktionen: PE, PP, PET, PS, PVC, Verbund, NI und Rest. Nach der Analyse der Abfallproben erfolgte die Auswertung der Daten. Mit Hilfe der für die EBS-Produktion interessanten Fraktionen PE, PP, PET und PS wurde der Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten, sowie einem Worst-Case Szenario, auf die Probenzusammensetzung untersucht. Neben der Gesamtprobe wurden auch die Einzelproben E1, E4 und E5 untersucht. Um zusätzlich die Änderungen der Parameter zu betrachten, wurden die einzelnen Fraktionen noch um den Heizwert erweitert. Damit erfolgte anschließend die Berechnung der Heizwerte der Probenzusammensetzungen.

Wie zu erwarten, zeigte sich bei der Auswertung der Daten, dass eine Erhöhung der Recyclingrate mit einer Entfernung von heizwertreichem Probenmaterial einhergeht. Vor allem betrifft das die leicht zu recycelnden Kunststofffraktionen PE, PP, PET und PS. Die Erhöhung der Recyclingraten führt zu einer stetigen Abnahme der KS-Fraktionen in der Probe. Eine Entfernung dieser Fraktionen hat folglich auch Einfluss auf den Heizwert. Dieser sinkt bei der Probe E1 von 15,0 MJ/kg bei 0 % Recycling, auf 12,1 MJ/kg beim Worst-Case Szenario. Bei der Probe E4 sinkt er bei diesen Szenarien von 16,9 MJ/kg auf 12,7 MJ/kg und die Werte von E5 fallen von 14,7 MJ/kg auf 11,5 MJ/kg.

Anhand definierter Parameter, beim EBS sind das hauptsächlich Heizwert und Korngröße, kann er in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden. Egal welches Szenario man betrachtet, die Abfallzusammensetzung der Proben E1, E4 und E5 eignet sich in unbehandelter Form nur für einen Einsatzort im Kalzinator- oder Hotdisc-Bereich eines Zementwerkes. Es ergibt sich für alle drei Proben folgender Einsatzort:

- **0 % Recycling/Best-Case:** Kalzinator/Hotdisc
- **25 % Recycling:** Kalzinator/Hotdisc
- **50 % Recycling:** Kalzinator/Hotdisc
- **75 % Recycling:** Kalzinator/Hotdisc
- **Worst-Case:** Kalzinator/Hotdisc

Auf kurze Sicht sind große Änderungen, was die Verfügbarkeit und Zusammensetzung von Abfall zur Herstellung von EBS betrifft, eher unwahrscheinlich. Mittelfristig wird sich, mit erhöhten Recyclingraten von 55, 60 und 65 % für Siedlungs- und Gewerbeabfälle, die Zusammensetzung des EBS voraussichtlich hin zu Bestandteilen mit geringerem Heizwert verändern. Das hat zur Folge, dass sich der Einsatzort von EBS aus gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfällen von der Primärfeuerung hin zur Sekundärfeuerung verschieben könnte.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hrsg) (2022) Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022; Teil 1; Entwurfsfassung zur Konsultation. file:///C:/Users/marti/Downloads/BAWP_2022_Teil_1.pdf

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2014) Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten; Verpackungsverordnung. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20008902>. Zugegriffen: 25. Juni 2022

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2022) Verordnung über die Verbrennung von Abfällen; (Abfallverbrennungsverordnung - AVV). <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002239>. Zugegriffen: 25. Juni 2022

Engel H, Hannover CAK (1990) Kunststoffe (Plaste). In: Engel H, Kestner CA (Hrsg) Grundlagen. Teubner, Stuttgart, S 73–78

Gehrmann H-J, Seifert H, Beckmann M, Glorius T (2012) Ersatzbrennstoffe in der Kraftwerkstechnik. Chemie Ingenieur Technik 84:1085–1098. doi:10.1002/cite.201100214

Khodier K, Viczek SA, Curtis A, Aldrian A, O’Leary P, Lehner M, Sarc R (2020) Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part I: procedure, particle size and sorting analysis. Int. J. Environ. Sci. Technol. 17:959–972. doi:10.1007/s13762-019-02526-w

Lorber KE, Sarc R, Pomberger R (2010) Österreichische Erfahrungen zum Einsatz verschiedener Abfälle als Ersatzbrennstoffe (EBS) und mögliche Anwendungsprobleme Türkisch-Deutsche Abfalltage - Ressourcenschutz durch Umsetzung nachhaltiger Abfallwirtschaft, S 327–348

Möllnitz S, Khodier K, Pomberger R, Sarc R (2020) Grain size dependent distribution of different plastic types in coarse shredded mixed commercial and municipal waste. Waste management (New York, N.Y.) 103:388–398. doi:10.1016/j.wasman.2019.12.037

Pomberger R (2008) Entwicklung von Ersatzbrennstoff für das HOTDISC-Verfahren und Analyse der abfallwirtschaftlichen Relevanz. Dissertation, Leoben

Pomberger R, Curtis A (2012) Neue Entwicklungen bei der Produktion und Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Österreich Abfallwirtschafts und Energiekonferenz - Energie aus Abfall, S 721–739

Pruckner E (2003) Energiegewinnung aus Ersatzbrennstoffen – Problemlösung für die Zukunft? Fachhochschule Heilbronn. <http://www.ad-acta-buero.de/stz-veu/Manuskript%20Artikel%20wlb.pdf>. Zugegriffen: 01. September 2022

Sarc R (2015) Herstellung, Qualität und Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen zur Erreichung der 100%-igen thermischen Substitution in der Zementindustrie. Dissertation, Leoben

Sarc R, Seidler IM, Kandlbauer L, Lorber KE, Pomberger R (2019) Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry - Update 2019. Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 37:885–897. doi:10.1177/0734242X19862600

Sarc R, Viczek S (2022) Co-Processing von Ersatzbrennstoffen in der österreichischen Zementindustrie; Aktuelle SRF-Spezifikationen für stoffliche und thermische Verwertung. In: Thiel S, Thomé-Kozmiensky E, Quicker P, Gosten A (Hrsg) Energie aus Abfall, S 519–532

Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (Hrsg) (2019) Auf dem Weg zu einer CO₂-neutralen Gesellschaft; Jahresbericht 2018/19 der österreichischen Zementindustrie. https://www.zement.at/downloads/downloads_2019/nachhaltigkeitsbericht-2018_19_einseitig.pdf. Zugegriffen: 12. September 2022

Viczek SA, Aldrian A, Pomberger R, Sarc R (2020) Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry. Resources, Conservation and Recycling 156:104696. doi:10.1016/j.resconrec.2020.104696

Viczek SA, Lorber KE, Pomberger R, Sarc R (2021) Production of contaminant-depleted solid recovered fuel from mixed commercial waste for co-processing in the cement industry. Fuel 294:120414. doi:10.1016/j.fuel.2021.120414

Weissenbach T, Sarc R (2022) Particle-specific characterisation of non-hazardous, coarse-shredded mixed waste for real-time quality assurance. Journal of environmental management 301:113878. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113878

6.2 Abkürzungsverzeichnis

z.B.:	zum Beispiel
usw.	und so weiter
div.	diverse
etc.	et cetera
ggf.	gegebenenfalls
Fe	Eisen
NE	Nichteisen
EBS	Ersatzbrennstoff
EU	Europäische Union
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
NIR	Nahinfrarot
Hu	untere Heizwert
Ho	obere Heizwert

OS	Originalsubstanz
TS	Trockensubstanz
TM	Trockenmasse
MJ	Megajoule
kJ	Kilojoule
LHV	lower heating value
mm	Millimeter
s	Sekunden
t	Tonnen
kg	Kilogramm
l	Liter
U/min	Umdrehungen pro Minute
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
KS	Kunststoff
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PET	Polyethylenterephthalat
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
NI	nicht identifiziert
EAG	Elektroaltgerät
PPK	Papier, Pappe und Karton

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Klassifizierung von Ersatzbrennstoffqualitäten, Quelle: Lorber et al. (2010).....	7
Tabelle 2: Grenzwerte in [mg/MJ] für Abfälle bei der Verbrennung in unterschiedlichen Mitverbrennungsanlagen, Quelle: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2022).....	9
Tabelle 3: Zusammensetzung einer EBS Probe mit Premium Qualität, Quelle: Sarc et al. (2019), modifiziert von Martin Berger	11
Tabelle 4: Sortierte Abfallarten und die Anordnung der zugehörigen Probenkübel auf dem Sortiertisch sowie die Arbeitspositionen	22
Tabelle 5: Verjüngungsschema für die Proben E5, E8 und E9	23
Tabelle 6: Zuordnung der Kunststoffe zu spezifischen Farbspektren.....	24
Tabelle 7: Heizwerte aus der Literatur, Quelle: Weissenbach und Sarc (2022)	28
Tabelle 8: Ergebnis der Probenahme für die Proben E1 bis E10	29
Tabelle 9: Zusammenhang Siebschnitt und entstehende Korngrößenbereiche	30

Tabelle 10: Ergebnis der allgemeinen Sortierung als Mittelwert über alle Proben aufgeteilt in Korngrößenbereiche und Fraktionen, Quelle: Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	43
Tabelle 11: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf ausgewählte Fraktionen	53
Tabelle 12: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E1	54
Tabelle 13: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E4	54
Tabelle 14: Einfluss von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E5	55
Tabelle 15: Heizwerte der Proben E1, E4 und E5 über alle Korngrößenbereiche	58
Tabelle 16: Ergebnis der Heizwertberechnung von E1	58
Tabelle 17: Ergebnis der Heizwertberechnung von E4	59
Tabelle 18: Ergebnis der Heizwertberechnung von E5	59
Tabelle 19: Mittelwert und Standardabweichung der Heizwerte der Proben E1, E4 und E5	59
Tabelle 20: Änderung der Heizwerte der Probe E1 über die Recyclingraten	60
Tabelle 21: Änderung der Heizwerte der Probe E4 über die Recyclingraten	61
Tabelle 22: Änderung der Heizwerte der Probe E5 über die Recyclingraten	62
Tabelle 23: Kriterien für den Einsatzort von EBS, Quelle: Lorber et al. (2010), modifiziert von Martin Berger	64
Tabelle 24: Einsatzbereich der Proben E1, E4 und E5 bei unterschiedlichen Recyclingraten	64
Tabelle 25: Überblick über die Szenarien, ihren jeweiligen Heizwert und Einsatzort sowie einem Vergleich mit realen Daten aus Sarc et al. (2019)	65
Tabelle 27: Siebergebnis der Probe E1	I
Tabelle 28: Siebergebnis der Probe E2	I
Tabelle 29: Siebergebnis der Probe E3	II
Tabelle 30: Siebergebnis der Probe E4	II
Tabelle 31: Siebergebnis der Probe E5	III
Tabelle 32: Siebergebnis der Probe E6	III
Tabelle 33: Siebergebnis der Probe E7	IV
Tabelle 34: Siebergebnis der Probe E8	IV
Tabelle 35: Siebergebnis der Probe E9	V
Tabelle 36: Siebergebnis der Probe E10	V

Tabelle 37: Sortierergebnis für die Klasse > 200 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	VI
Tabelle 38: Sortierergebnis für die Klasse 200 – 100 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	VI
Tabelle 39: Sortierergebnis für die Klasse 100 – 80 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	VII
Tabelle 40 Sortierergebnis für die Klasse 80 – 60 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	VII
Tabelle 41: Sortierergebnis für die Klasse 60 – 40 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	VIII
Tabelle 42: Sortierergebnis für die Klasse 40 – 20 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger	VIII
Tabelle 43: Ergebnisse der Bestimmung des unteren Heizwertes bezogen auf die Trockensubstanz der Proben E1, E4 und E5.....	IX
Tabelle 44: Ergebnisse der Bestimmung des oberen Heizwertes bezogen auf die Trockensubstanz der Proben E1, E4 und E5.....	IX

6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Substitutionsraten in der Zementindustrie, Quelle: Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (2019)	4
Abbildung 2: Fließbild des Prozessschemas einer modernen Anlage, Quelle: Sarc und Viczek (2022)	6
Abbildung 3: Einsatzgebiet verschiedener EBS Arten, abhängig von Heizwert und Korngröße, Quelle: Lorber et al. (2010).....	7
Abbildung 4: Primär- und Sekundärfeuerung in einem Zementwerk, Quelle: Pomberger (2008).....	8
Abbildung 5: Verwendete Abfallsäcke, Quelle: https://www.swirl.at	13
Abbildung 6: Verwendete Mörtelwanne, Quelle: https://www.obl.at/baueimer-moertelkuebel/lux-moertelwanne-90-l/p/1829498	13
Abbildung 7: Abfallbehälter mit den Größen 240 l (linkes Bild), Quelle: Martin Berger; und 1100 l (rechtes Bild), Quelle: https://www.plasteelaste.de/mini-muellcontainer-1100-liter	14
Abbildung 8: Feinwaage der Firma Kern, Quelle: Martin Berger	14
Abbildung 9: Waage der Firma G&G, Quelle: Martin Berger.....	15
Abbildung 10: Schwerlastwaage der Firma Kern, Quelle: Martin Berger.....	15
Abbildung 11: Laborwaage der Firma G&G, Quelle: Martin Berger	15

Abbildung 12: Komptech Terminator 5000S, Quelle: https://www.komptech.com/produkte/terminator-e-mobile/#/	16
Abbildung 13: Komptech Multimeasure, Quelle: https://www.komptech.com/produkte/multistar-one/#/.....	16
Abbildung 14: Schematische Darstellung des Trommelsiebs inklusive Abmessungen in mm, Quelle: Khodier et al. (2020).....	17
Abbildung 15: Trommelsieb mit austauschbaren Siebschnitten, Quelle: Martin Berger.....	17
Abbildung 16: Sortiertisch inklusive Probenkübel am Standort St. Michael, Quelle: Martin Berger	18
Abbildung 17: NIR-Sortierer im Altlastenlabor des AVAW, Quelle: Martin Berger.....	18
Abbildung 18: NIR-Sortierer, rechts: Probenbehälter mit Trennblech, Mitte: Düsenleiste, links: Aufgabetrichter mit Rüttelwanne und geneigter Detektorfläche, Quelle: Martin Berger..	19
Abbildung 19: Versuchsaufbau bei der Firma Mayer Recycling; von rechts nach links: Aufgabe mit Radlader, Terminator, Multimeasure, Radlader für Probenahme, Quelle: Sandra Viczek	20
Abbildung 20: Aufteilung der sortierten Fraktionen und Einteilung für die Betrachtung der folgenden Szenarien, links: Fraktionen aus der allgemeinen und NIR-Sortierung, Mitte: Zusammenfassung aller mehrfach vorkommenden Fraktionen, rechts: Einteilung in eine für die Produktion von EBS interessante Fraktion (oben) und eine Fraktion, die aussortiert wird (unten), die Massen sind auf die Originalsubstanz (OS) bezogen	26
Abbildung 21: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 200 der Probe E7, Quelle: Martin Berger	30
Abbildung 22: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 100 der Probe E7, Quelle: Martin Berger	31
Abbildung 23: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 80 der Probe E7, Quelle: Martin Berger ..	32
Abbildung 24: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 60 der Probe E7, Quelle: Martin Berger ..	32
Abbildung 25: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 40 der Probe E7, Quelle: Martin Berger ..	33
Abbildung 26: Siebüberlauf bei Siebschnitt (S.S.) 20 der Probe E7, Quelle: Martin Berger ..	33
Abbildung 27: Summenkurven für alle Proben über die Siebschnitte, Quelle: Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger.....	34
Abbildung 28: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Getr.), Metall, KS 3D, KS 2D, Holz, Quelle: Martin Berger.....	37
Abbildung 29: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verbund, Textil, Schwarz, Rest, PPK, Quelle: Martin Berger	37
Abbildung 30: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Metall, KS 3D, KS 2D, Holz und EAG, Quelle: Martin Berger	37
Abbildung 31: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Schwarz, Rest, PPK, PET (Getr.) und Organik, Quelle: Martin Berger.....	38

Abbildung 32: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verbund, Textil und Tetra, Quelle: Martin Berger	38
Abbildung 33: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: KS 2D, Inert, Holz, Gummi und EAG, Quelle: Martin Berger	38
Abbildung 34: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Rest, PPK, PET (Getr.), Metall und KS 3D, Quelle: Martin Berger	39
Abbildung 35: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verbund, Textil, Tetra und Schwarz, Quelle: Martin Berger	39
Abbildung 36: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Inert, Holz, Gummi, EAG und Batterien, Quelle: Martin Berger	39
Abbildung 37: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Essig), Organik, Metall, KS 3D und KS 2D, Quelle: Martin Berger	40
Abbildung 38: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Tetra, Schwarz, Rest, PPK und PET (Getr.), Quelle: Martin Berger	40
Abbildung 39: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verpackung mit Inhalt, Verbund und Textil, Quelle: Martin Berger	40
Abbildung 40: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Inert, Holz, Gummi, EAG, Batterien, Quelle: Martin Berger	41
Abbildung 41: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Getr.), Organik, Metall, KS 3D, KS 2D, Quelle: Martin Berger	41
Abbildung 42: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Textil, Tetra, Schwarz, Rest, PPK, Quelle: Martin Berger	41
Abbildung 43: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verpackung mit Inhalt und Verbund, Quelle: Martin Berger	41
Abbildung 44: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: KS 2D, Inert, Holz, Gummi, EAG, Quelle: Martin Berger	42
Abbildung 45: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: PET (Getr.), PET (Essig), Organik, Metall, KS 3D, Quelle: Martin Berger	42
Abbildung 46: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Textil, Tetra, Schwarz, Rest, PPK, Quelle: Martin Berger	42
Abbildung 47: Aussortierte Fraktionen, von rechts nach links: Verpackung mit Inhalt und Verbund, Quelle: Martin Berger	43
Abbildung 48: Grafische Auswertung als Boxplot der allgemeinen Sortierung	44
Abbildung 49: Sortierte Fraktionen, links: Anfangszusammensetzung, rechts: PE, Quelle: Martin Berger	46
Abbildung 50: Sortierte Fraktionen, links: PET, rechts: Restfraktion, Quelle: Martin Berger ..	46

Abbildung 51: Gesamte Startmasse vor der Sortierung (links und rechts), Quelle: Martin Berger	46
Abbildung 52: Sortierte Fraktionen, links: PE, rechts: PP, Quelle: Martin Berger	47
Abbildung 53: Sortierte Fraktionen, links: PET, rechts: PS, Quelle: Martin Berger	47
Abbildung 54: Sortierte Fraktionen, links: PVC, rechts: Verbund, Quelle: Martin Berger	47
Abbildung 55: Sortierte Fraktionen, links: NI, rechts: Rest, Quelle: Martin Berger	48
Abbildung 56: Sortierte Fraktionen, links: Startzusammensetzung, rechts: PE, Quelle: Martin Berger	48
Abbildung 57: Sortierte Fraktionen, links: PP, rechts: PET, Quelle: Martin Berger	48
Abbildung 58: Sortierte Fraktionen, links: PS, rechts: PVC, Quelle: Martin Berger	49
Abbildung 59: Sortierte Fraktionen, links: Verbund, rechts: NI, Quelle: Martin Berger	49
Abbildung 60: Restfraktion, Quelle: Martin Berger	49
Abbildung 61: Sortierte Fraktionen, links: Startfraktion, rechts: PE, Quelle: Martin Berger	50
Abbildung 62: Sortierte Fraktionen, links: PP, rechts: PET, Quelle: Martin Berger	50
Abbildung 63: Sortierte Fraktionen, links: PS, rechts: PVC, Quelle: Martin Berger	50
Abbildung 64: Sortierte Fraktionen, links: Verbund, rechts: NI, Quelle: Martin Berger	51
Abbildung 65: Restfraktion, Quelle: Martin Berger	51
Abbildung 66: Zusammensetzung der 2D- und 3D-Fraktion. Quelle: Möllnitz et al. (2020), modifiziert von Martin Berger	52
Abbildung 67: Teilergebnis der eigenen Sortierung der 2D-Fraktion und 3D-Fraktion	52
Abbildung 68: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Gesamtprobe	53
Abbildung 69: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E1	54
Abbildung 70: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E4	55
Abbildung 71: Grafische Darstellung des Einflusses von unterschiedlichen Recyclingraten auf die Zusammensetzung von E5	56
Abbildung 72: Behandlung von sortenreinen Kunststoffabfällen und kunststoffhaltigen Abfällen in Österreich im Referenzjahr 2019 in [t], Quelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022)	57
Abbildung 73: Grafische Darstellung der Änderung der Heizwerte von E1 über die Recyclingraten	61

Abbildung 74: Grafische Darstellung der Änderung der Heizwerte von E4 über die Recyclingraten	62
Abbildung 75: Grafische Darstellung der Änderung der Heizwerte von E5 über die Recyclingraten	63

Ergebnisse der Siebung für alle Proben von E1 bis E10:

Die Anteile der Kornfraktion für jede einzelne Probe werden in Tabelle 26 bis Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 26: Siebergebnis der Probe E1

E1	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	203,0	192,4
0-5	9,4	4,9%	9,4	4,9%		
10-5	34,9	18,1%	25,5	13,3%	Differenz	
20-10	59,7	31,0%	24,8	12,9%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	90,7	47,1%	31,0	16,1%	10,5	5,2%
60-40	113,5	59,0%	22,8	11,9%		
80-60	137,9	71,6%	24,3	12,6%		
100-80	152,8	79,4%	14,9	7,8%		
200-100	184,5	95,9%	31,8	16,5%		
>200	192,4	100,0%	7,9	4,1%		
Summe			192,4	100,0%		

Tabelle 27: Siebergebnis der Probe E2

E2	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	114,2	107,4
0-5	7,2	6,7%	7,2	6,7%		
10-5	10,6	9,8%	3,3	3,1%	Differenz	
20-10	17,1	15,9%	6,5	6,1%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	29,8	27,7%	12,7	11,8%	6,8	5,9%
60-40	44,6	41,5%	14,9	13,8%		
80-60	63,0	58,6%	18,4	17,1%		
100-80	77,6	72,2%	14,6	13,6%		
200-100	105,2	98,0%	27,6	25,7%		
>200	107,4	100,0%	2,2	2,0%		
Summe			107,4	100,0%		

Tabelle 28: Siebergebnis der Probe E3

E3	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	160,6	150,5
0-5	10,7	7,1%	10,7	7,1%		
10-5	23,9	15,9%	13,2	8,8%	Differenz	
20-10	39,0	25,9%	15,1	10,0%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	57,9	38,5%	19,0	12,6%	10,1	6,3%
60-40	81,0	53,9%	23,1	15,3%		
80-60	106,6	70,8%	25,5	17,0%		
100-80	123,1	81,8%	16,5	11,0%		
200-100	147,3	97,9%	24,2	16,1%		
>200	150,5	100,0%	3,2	2,1%		
Summe			150,5	100,0%		

Tabelle 29: Siebergebnis der Probe E4

E4	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	84,9	79,5
0-5	10,0	12,5%	10,0	12,5%		
10-5	13,9	17,5%	3,9	4,9%	Differenz	
20-10	22,0	27,6%	8,1	10,2%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	31,2	39,3%	9,2	11,6%	5,4	6,4%
60-40	42,5	53,5%	11,3	14,2%		
80-60	52,2	65,7%	9,8	12,3%		
100-80	60,6	76,3%	8,4	10,6%		
200-100	76,5	96,3%	15,9	20,0%		
>200	79,5	100,0%	3,0	3,7%		
Summe			79,5	100,0%		

Tabelle 30: Siebergebnis der Probe E5

E5	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	170,9	163,6
0-5	15,1	9,3%	15,1	9,3%		
10-5	24,9	15,2%	9,8	6,0%	Differenz	
20-10	41,9	25,6%	16,9	10,4%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	60,8	37,2%	18,9	11,6%	7,3	4,3%
60-40	81,8	50,0%	21,0	12,9%		
80-60	104,1	63,6%	22,3	13,6%		
100-80	119,6	73,1%	15,5	9,5%		
200-100	157,4	96,2%	37,8	23,1%		
>200	163,6	100,0%	6,2	3,8%		
Summe			163,6	100,0%		

Tabelle 31: Siebergebnis der Probe E6

E6	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	127,3	117,7
0-5	13,0	11,1%	13,0	11,1%		
10-5	16,4	13,9%	3,4	2,9%	Differenz	
20-10	26,8	22,7%	10,4	8,8%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	38,9	33,1%	12,2	10,3%	9,5	7,5%
60-40	53,1	45,1%	14,2	12,0%		
80-60	73,1	62,1%	20,0	17,0%		
100-80	85,8	72,9%	12,8	10,8%		
200-100	111,5	94,7%	25,7	21,8%		
>200	117,7	100,0%	6,3	5,3%		
Summe			117,7	100,0%		

Tabelle 32: Siebergebnis der Probe E7

E7	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	155,1	143,3
0-5	14,0	9,8%	14,0	9,8%		
10-5	20,3	14,2%	6,3	4,4%	Differenz	
20-10	30,9	21,6%	10,6	7,4%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	47,9	33,4%	16,9	11,8%	11,8	7,6%
60-40	68,4	47,7%	20,6	14,3%		
80-60	97,1	67,7%	28,7	20,0%		
100-80	113,2	79,0%	16,1	11,2%		
200-100	137,7	96,1%	24,5	17,1%		
>200	143,3	100,0%	5,7	3,9%		
Summe			143,3	100,0%		

Tabelle 33: Siebergebnis der Probe E8

E8	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	177,9	168,6
0-5	19,5	11,6%	19,5	11,6%		
10-5	33,4	19,8%	13,9	8,2%	Differenz	
20-10	51,0	30,3%	17,7	10,5%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	69,9	41,5%	18,9	11,2%	9,3	5,3%
60-40	96,1	57,0%	26,2	15,6%		
80-60	116,2	68,9%	20,1	11,9%		
100-80	131,7	78,1%	15,5	9,2%		
200-100	159,7	94,7%	28,0	16,6%		
>200	168,6	100,0%	8,9	5,3%		
Summe			168,6	100,0%		

Tabelle 34: Siebergebnis der Probe E9

E9	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	226,8	214,8
0-5	25,8	12,0%	25,8	12,0%		
10-5	39,3	18,3%	13,6	6,3%	Differenz	
20-10	60,6	28,2%	21,2	9,9%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	84,6	39,4%	24,1	11,2%	12,0	5,3%
60-40	118,9	55,3%	34,2	15,9%		
80-60	145,8	67,9%	27,0	12,5%		
100-80	165,1	76,9%	19,3	9,0%		
200-100	202,1	94,1%	37,0	17,2%		
>200	214,8	100,0%	12,7	5,9%		
Summe			214,8	100,0%		

Tabelle 35: Siebergebnis der Probe E10

E10	Aufsummiert		Einzel		Gesamte Probe	
	Masse	Anteile	Masse	Anteile	Masse [kg]	
Kornklasse	[kg]	[%]	[kg]	[%]	Input	Output
0	0	0	0	0	125,0	116,4
0-5	13,2	11,3%	13,2	11,3%		
10-5	16,8	14,4%	3,6	3,1%	Differenz	
20-10	25,4	21,8%	8,7	7,5%	Masse [kg]	Anteile [%]
40-20	38,1	32,7%	12,7	10,9%	8,6	6,9%
60-40	50,5	43,4%	12,4	10,6%		
80-60	66,1	56,7%	15,6	13,4%		
100-80	77,1	66,2%	11,1	9,5%		
200-100	105,2	90,4%	28,1	24,1%		
>200	116,4	100,0%	11,2	9,6%		
Summe			116,4	100,0%		

Ergebnisse der händischen Sortierung für alle Proben E1 bis E10:

Die Ergebnisse der händischen Sortierung der Proben E1 bis E10 für die Klassen > 200 mm bis 40 – 20 mm sind in Tabelle 36 bis Tabelle 41 ersichtlich. Zu erwähnen ist der Umstand, dass bei der Probe E4 der Kornklasse > 200 mm die Differenz zwischen der sortierten und der gesiebten Masse negativ ist. Das ist technisch nicht möglich und wahrscheinlich durch einen Wiegefehler, oder einer inkorrekten Erfassung und Eintragung der Daten verursacht. Für die Proben E5, E8 und E9 wurden für die Klassen 100 – 80 mm bis 40 – 20 mm Verjüngungsschritte durchgeführt. Die Differenz zwischen der sortierten und der gesiebten Masse ist daher entsprechen hoch. Die Verjüngungsfaktoren sind in den Tabellen angegeben.

Tabelle 36: Sortierergebnis für die Klasse > 200 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Engel, modifiziert von Martin Berger

>200	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Summe [kg]	Anteile [%]
KS 2D	1,0	0,3	1,8	1,1	1,0	1,7	1,5	1,1	1,6	3,8	14,9	23,6%
KS 3D	0,9	0,4	0,2	1,5	1,7	0,8	0,6	2,3	2,3	3,2	13,9	22,1%
Schwarz	0,0	0,9	0,4	0,0	0,1	1,3	0,2	2,8	1,6	0,7	8,0	12,6%
PET-Getränke	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Tetra	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Gummi	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	5,7%
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Verbund	0,8	0,4	0,4	0,0	2,1	0,5	0,3	0,1	0,2	1,0	5,9	9,3%
EAG	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1%
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Holz	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2%
PPK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,6	1,0%
Textil	1,3	0,0	0,1	0,6	0,8	0,9	2,3	1,7	5,3	0,6	13,6	21,5%
Metall	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,2	0,2	0,6	0,1	1,7	2,6%
Inert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Rest	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,3	0,8	1,3%
Organik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Summe [kg]	7,8	2,1	2,9	3,2	5,8	5,8	5,3	8,5	12,0	9,7	63,1	100,0%
Siebmassen [kg]	7,9	2,2	3,2	3,0	6,2	7,3	5,7	8,9	12,7	11,2	67,1	
Differenz [kg]	0,1	0,1	0,3	-0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	1,5	3,9	
Differenz [%]	1,4%	5,5%	9,1%	-8,9%	5,1%	7,2%	7,1%	4,1%	5,3%	13,3%	5,9%	

Tabelle 37: Sortierergebnis für die Klasse 200 – 100 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Engel, modifiziert von Martin Berger

200-100	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Summe [kg]	Anteile [%]
KS 2D	3,0	3,6	6,1	1,9	4,7	2,6	4,1	2,8	3,1	4,9	36,8	14,2%
KS 3D	4,1	11,6	5,0	3,3	5,8	5,7	5,6	5,2	4,4	3,1	53,8	20,8%
Schwarz	1,6	2,9	3,1	2,4	3,2	2,3	1,8	4,6	5,9	4,5	32,3	12,5%
PET-Getränke	0,1	0,8	0,5	0,1	0,6	0,6	0,7	0,0	0,2	0,1	3,8	1,5%
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1%
Tetra	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7	0,3%
Gummi	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,3%
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1%
Verbund	3,4	2,8	1,4	2,4	7,3	3,5	3,2	3,1	3,8	4,1	35,0	13,5%
EAG	0,6	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	0,0	0,1	1,7	0,6%
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Holz	0,8	0,4	1,4	0,6	2,0	1,0	1,0	1,6	1,3	1,5	11,5	4,5%
PPK	4,6	2,3	1,1	1,4	3,5	3,3	3,2	3,7	3,4	3,6	30,1	11,6%
Textil	4,7	0,6	2,2	1,6	2,1	1,9	1,7	1,3	3,7	1,0	20,7	8,0%
Metall	5,4	1,3	0,9	0,9	3,4	1,1	1,1	1,9	3,1	1,9	20,8	8,1%
Inert	0,8	0,0	0,2	0,0	0,4	1,4	0,0	0,9	0,9	0,5	5,1	2,0%
Rest	0,3	0,2	0,2	0,1	0,5	0,2	0,2	0,1	0,7	0,9	3,4	1,3%
Organik	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	1,9	0,8%
Summe [kg]	30,4	26,9	22,5	14,6	33,6	23,9	22,9	26,0	32,0	26,1	258,8	100,0%
Siebmassen [kg]	31,8	27,6	24,2	15,9	37,8	25,7	24,5	28,0	37,0	28,1	280,5	
Differenz [kg]	1,4	0,7	1,7	1,3	4,2	1,8	1,6	2,0	5,0	2,0	21,8	
Differenz [%]	4,4%	2,7%	6,9%	8,1%	11,1%	7,1%	6,4%	7,3%	13,6%	7,1%	7,8%	

Tabelle 38: Sortierergebnis für die Klasse 100 – 80 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger

100-80	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Summe [kg]	Anteile [%]
KS 2D	0,7	2,2	3,3	0,8	0,9	1,4	2,7	0,6	0,7	0,9	14,1	12,5%
KS 3D	2,0	5,6	4,2	1,6	2,5	2,4	4,8	1,5	1,3	1,5	27,3	24,2%
Schwarz	1,1	1,2	1,3	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	1,1	1,9	10,9	9,7%
PET-Getränke	0,1	0,7	0,7	0,1	0,4	0,7	1,5	0,1	0,1	0,2	4,5	4,0%
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1%
Tetra	0,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,7	0,6%
Gummi	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3%
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2%
Verbund	1,3	0,7	1,1	1,6	1,3	1,7	1,2	0,7	0,9	0,7	11,2	9,9%
EAG	0,4	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,8	0,7%
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Holz	0,7	0,4	1,2	0,9	0,6	0,6	0,8	1,1	0,4	1,4	8,0	7,1%
PPK	2,1	1,4	1,2	0,6	0,9	1,6	1,2	1,0	1,0	2,0	13,0	11,5%
Textil	1,3	0,3	1,0	0,4	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,4	5,2	4,6%
Metall	1,4	1,0	0,9	0,6	1,0	1,9	1,3	0,6	1,9	0,5	11,1	9,8%
Inert	1,6	0,1	0,5	0,0	0,1	0,0	0,3	1,1	0,0	0,7	4,3	3,8%
Rest	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	1,1	1,0%
Organik	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2%
Summe [kg]	13,0	14,2	15,8	7,8	9,1	11,8	15,3	7,8	8,1	10,1	112,9	100,0%
Siebmassen [kg]	14,9	14,6	16,5	8,4	15,5	12,8	16,1	15,5	19,3	11,1	144,6	
Differenz [kg]	2,0	0,4	0,7	0,6	6,4	1,0	0,8	7,6	11,1	1,0	31,7	
Differenz [%]	13,2%	2,9%	4,3%	7,3%	41,5%	7,8%	4,9%	49,4%	57,7%	8,7%	21,9%	
Verjüngungsfaktor					40%			50%	50%			

Tabelle 39 Sortierergebnis für die Klasse 80 – 60 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger

80-60	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Summe [kg]	Anteile [%]
KS 2D	1,2	2,3	3,0	0,7	0,7	1,2	7,2	0,3	1,1	1,3	18,8	11,3%
KS 3D	2,5	6,6	7,0	1,6	2,4	4,8	6,8	1,3	2,0	1,9	36,9	22,2%
Schwarz	2,6	1,4	1,8	1,0	1,1	1,8	1,6	0,7	1,2	2,0	15,2	9,1%
PET-Getränke	0,1	0,7	0,3	0,2	0,3	0,5	1,3	0,0	0,0	0,1	3,5	2,1%
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2%
Tetra	0,0	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,6	0,4%
Gummi	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	1,1	0,6%
Verpackung mit Inhalt	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5	0,3%
Verbund	1,2	1,2	2,3	1,2	1,2	1,4	2,4	0,4	1,3	1,3	14,0	8,4%
EAG	0,3	0,0	1,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	2,2	1,3%
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2%
Holz	2,4	1,6	2,6	1,2	1,2	2,5	2,1	1,5	1,7	2,2	19,0	11,5%
PPK	3,5	1,3	2,5	1,3	1,0	2,8	1,8	0,8	1,4	2,3	18,5	11,1%
Textil	1,4	0,5	0,7	0,3	0,2	0,8	0,9	0,2	0,6	0,7	6,1	3,7%
Metall	4,7	1,1	1,2	0,5	1,3	1,2	1,9	0,4	1,4	1,3	15,0	9,0%
Inert	1,4	0,6	1,2	0,4	1,4	1,0	0,8	1,8	1,0	0,8	10,5	6,3%
Rest	0,5	0,3	0,2	0,1	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,2	3,2	1,9%
Organik	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,3%
Summe [kg]	22,2	17,8	24,2	8,8	11,5	18,7	27,9	8,1	12,3	14,4	165,9	100,0%
Siebmassen [kg]	24,3	18,4	25,5	9,8	22,3	20,0	28,7	20,1	27,0	15,6	211,5	
Differenz [kg]	2,1	0,5	1,4	0,9	10,8	1,2	0,8	11,9	14,6	1,2	45,6	
Differenz [%]	8,6%	3,0%	5,4%	9,3%	48,6%	6,1%	2,8%	59,5%	54,4%	7,7%	21,6%	
Verjüngungsfaktor					50%			50%	50%			

Tabelle 40: Sortierergebnis für die Klasse 60 – 40 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger

60-40	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Summe [kg]	Anteile [%]
KS 2D	0,9	1,3	5,7	0,7	0,5	0,7	3,1	0,7	0,6	0,6	14,7	10,7%
KS 3D	2,7	5,1	3,2	1,6	2,2	3,6	5,7	1,5	1,7	2,3	29,7	21,6%
Schwarz	3,0	1,4	1,7	1,3	0,8	1,2	1,3	0,8	0,8	1,3	13,6	9,9%
PET-Getränke	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,8	0,6%
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1%
Tetra	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1%
Gummi	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,8	0,6%
Verpackung mit Inhalt	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2%
Verbund	1,4	1,3	1,4	0,9	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	10,3	7,5%
EAG	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,8	0,5%
Batterien / Akkus	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2%
Holz	1,7	1,4	2,0	1,7	0,8	1,5	2,1	1,4	1,0	1,6	15,2	11,0%
PPK	2,4	1,5	2,0	1,5	1,1	2,2	1,6	1,3	0,9	2,0	16,4	12,0%
Textil	0,6	0,4	0,5	0,5	0,1	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	3,9	2,9%
Metall	4,1	0,7	1,5	0,8	0,6	0,6	1,8	0,7	0,5	1,0	12,3	9,0%
Inert	1,5	0,7	2,1	0,9	0,8	1,6	2,1	1,3	1,5	1,1	13,5	9,8%
Rest	1,2	0,3	0,7	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,7	0,2	4,2	3,0%
Organik	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2%
Summe [kg]	20,0	14,2	21,3	10,3	8,6	13,2	19,9	9,5	8,9	11,5	137,4	100,0%
Siebmassen [kg]	22,8	14,9	23,1	11,3	21,0	14,2	20,6	26,2	34,2	12,4	200,7	
Differenz [kg]	2,8	0,7	1,8	1,0	12,4	0,9	0,6	16,7	25,4	0,9	63,2	
Differenz [%]	12,4%	4,5%	7,6%	9,0%	59,0%	6,6%	3,0%	63,6%	74,1%	7,6%	31,5%	
Verjüngungsfaktor					50%			65%	70%			

Tabelle 41: Sortierergebnis für die Klasse 40 – 20 mm für alle Proben E1 bis E10, Quelle Maximilian Enengel, modifiziert von Martin Berger

40-20	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Summe [kg]	Anteile [%]
KS 2D	1,4	2,5	1,2	0,3	0,3	0,5	1,3	0,1	0,3	0,4	8,4	6,8%
KS 3D	4,1	3,4	3,9	1,7	1,8	2,9	4,5	1,0	1,2	2,5	26,9	21,9%
Schwarz	3,7	1,2	1,2	1,2	0,7	1,0	1,1	0,3	0,7	1,1	12,1	9,9%
PET-Getränke	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1%
PET-Essig	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Tetra	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0%
Gummi	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3%
Verpackung mit Inhalt	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2%
Verbund	1,0	0,7	0,7	0,4	0,9	0,9	1,0	0,4	0,4	0,5	7,0	5,7%
EAG	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,8	0,6%
Batterien / Akkus	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2%
Holz	1,5	1,2	1,6	1,2	0,8	0,9	1,3	0,7	0,7	1,4	11,2	9,1%
PPK	1,8	0,8	1,5	1,3	0,8	1,6	1,5	0,5	0,6	1,8	12,1	9,9%
Textil	0,5	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	1,9	1,5%
Metall	4,3	0,7	1,3	0,6	0,5	0,5	1,0	0,3	0,3	1,1	10,6	8,6%
Inert	3,6	1,1	3,8	1,0	1,7	2,1	3,8	1,8	1,5	2,1	22,4	18,3%
Rest	3,1	0,2	0,7	0,2	0,7	0,6	0,5	0,6	1,0	0,5	8,1	6,6%
Organik	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3%
Summe [kg]	25,5	12,3	16,3	8,1	8,6	11,3	16,5	5,9	6,8	11,8	122,9	100,0%
Siebmassen [kg]	31,0	12,7	19,0	9,2	18,9	12,2	16,9	18,9	24,1	12,7	175,6	
Differenz [kg]	5,6	0,4	2,7	1,1	10,4	0,9	0,4	13,0	17,3	0,9	52,7	
Differenz [%]	17,9%	3,4%	14,1%	12,3%	54,8%	7,1%	2,7%	68,7%	71,8%	6,9%	30,0%	
Verjüngungsfaktor					50%			65%	70%			

Ergebnisse der Heizwertuntersuchung des Labors:

In den Tabelle 42 und Tabelle 43 sind die Ergebnisse der weiteren Heizwertbestimmungen dargestellt. Diese wurden, neben dem für die Berechnungen verwendeten Heizwert, noch für den unteren Heizwert mit Bezug auf die Trockensubstanz (TS), sowie für den oberen Heizwert mit Bezug auf die Trockensubstanz (TS) bestimmt.

Tabelle 42: Ergebnisse der Bestimmung des unteren Heizwertes bezogen auf die Trockensubstanz der Proben E1, E4 und E5

Hu TS [kJ/kg]	E1	E4	E5
> 200	23900	24300	24100
200-100	23500	25400	16900
100-80	22900	25600	27600
80-60	20600	24500	18800
60-40	22500	19400	18300
40-20	15400	17700	17100
20-10	12800	1800	12600
10-5	12200	11600	5950
< 5	5620	5270	3170

Tabelle 43: Ergebnisse der Bestimmung des oberen Heizwertes bezogen auf die Trockensubstanz der Proben E1, E4 und E5

Ho TS [kJ/kg]	E1	E4	E5
> 200	26000	26400	26200
200-100	25500	27600	18400
100-80	24900	27900	30000
80-60	22400	26600	20400
60-40	24500	21100	19900
40-20	16700	19200	18500
20-10	13900	19600	13700
10-5	13300	12600	6470
< 5	6110	5730	3450